

# Mechanische Beschichtung für die Kaltmassivumformung von Stahl

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Peter Marx

aus Limburg an der Lahn

genehmigt vom

Fachbereich Material- und Geowissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt

Hauptberichterstatter:	Prof. Dr. H. E. Exner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. H. M. Ortner
Tag der Einreichung:	15. Mai 2003
Tag der mündlichen Prüfung:	24. Juni 2003

Darmstadt 2003

D 17

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>2</b>
2.1	Beanspruchungen bei Kaltmassivumformung von Stahl	2
2.2	Phosphatierung	3
2.3	Schmiermittel	5
2.4	Tribologische Prüfung	6
2.5	Ansätze für alternative Oberflächenbehandlungen	8
2.6	Mechanische Auftragverfahren	9
2.7	Herstellung der Strahlmittel	11
2.8	Methoden zur Schichtcharakterisierung	14
2.9	Umweltbeeinflussung	16
<b>3</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>17</b>
3.1	Auftrag von Beschichtungen	19
3.2	Untersuchung von Strahlmitteln und Beschichtungen	22
3.3	Verhalten der Beschichtungen bei der Umformung	25
3.4	Untersuchung der Umweltbeeinflussung	28
<b>4</b>	<b>Methoden zur Schichtcharakterisierung</b>	<b>30</b>
4.1	Metallographische Querschliffe	30
4.2	Bestimmung der Flächenbedeckung	31
4.3	Elementverteilungsanalyse (EDX und WDX)	32
4.4	Sekundärionen-Massenspektrometrie	33
4.5	Bestimmung der Oberflächenrauheit	34
4.6	Gravimetrie	35
4.7	Lokale Schichtdickenmessung	35
4.8	Auswahl der Methoden	37
<b>5</b>	<b>Aufbau und Verhalten der Strahlmittel</b>	<b>38</b>
5.1	Untersuchte Strahlmittel	38
5.2	Strahlmittel für Beschichtungsversuche	40

5.3	Verhalten der Strahlmittel beim Beschichtungsvorgang	44
<b>6</b>	<b>Eigenschaften der Beschichtungen</b>	<b>46</b>
6.1	Phosphatschichten	46
6.1.1	Eigenschaften der Phosphatschichten	46
6.1.2	Verhalten der Phosphatschicht bei der Umformung	48
6.2	Eigenschaften der mechanischen Beschichtungen	50
6.3	Beschichtung in Druckluft-Strahlversuchen	53
6.3.1	Werkstoffcharakterisierung	53
6.3.2	Vergleich der Strahlmittelarten	53
6.3.3	Einfluß der Strahlzeit	56
6.3.4	Einfluß des Strahlwinkels	57
6.3.5	Einfluß der kinetischen Energie des Strahlmittels	59
6.3.6	Einfluß der Werkstückoberfläche	60
6.3.7	Einfluß der Korrosion der Werkstückoberfläche	62
6.3.8	Einfluß des Werkstoffs	63
6.3.9	Wirkung verbrauchter Strahlmittel	64
6.4	Beschichtung in mechanischen Strahlanlagen	65
6.4.1	Einfluß der Chargenmenge	65
6.4.2	Einfluß des Strahlmitteldurchsatzes	66
6.4.3	Einfluß der Strahlzeit	66
6.4.4	Einfluß der Werkstückgeometrie	68
6.4.5	Einfluß der Strahlmittelzusammensetzung	69
6.4.6	Rauheit beschichteter Oberflächen	70
6.4.7	Beschichtung von Draht	71
<b>7</b>	<b>Verhalten der Beschichtungen bei der Umformung</b>	<b>73</b>
7.1	Spiketest	73
7.1.1	Einfluß der Rohteilgröße	73
7.1.2	Einfluß der Werkzeuggeometrie	74
7.1.3	Einfluß der Beschichtungen	74
7.1.4	Verhalten der mechanischen Beschichtung	76
7.1.5	Einfluß des Schichtgewichts	79
7.1.6	Einfluß der Flächenbedeckung	80

7.1.7	Einfluß des Schichtgewichts mit Schmiermittel	81
7.1.8	Härte und Temperatur der umgeformten Teile	82
7.1.9	Einfluß der Preßgeschwindigkeit	83
7.1.10	Einfluß der Schmiermittelmenge	84
7.1.11	Einfluß von Gesenkschmiermittel	84
7.2	Vorwärtsfließpressen	86
7.2.1	Einfluß der Beschichtungen	86
7.2.2	Einfluß des Schichtgewichts	86
7.3	Umformversuche in der Industrie	88
7.3.1	Mechanische Beschichtung mit Schmiermittel	88
7.3.2	Mechanische Beschichtung mit Gesenkschmiermittel	89
7.3.3	Umformung von mechanisch beschichtetem Draht	90
7.3.4	Verhalten der Beschichtung bei mehreren Umformschritten	91
7.3.5	Einfluß der Flächenbedeckung	91
7.3.6	Korrosion der Werkstücke	93
7.3.7	Grenzen der mechanischen Beschichtung	94
7.3.8	Beschädigungen in der Serienproduktion	94
7.4	Umweltbeeinflussung	96
<b>8</b>	<b>Mechanismus der mechanischen Beschichtung</b>	<b>99</b>
8.1	Rundes Strahlmittel	99
8.1.1	Haftung auf dem Werkstück und Flächenbedeckung	100
8.1.2	Einfluß der Härte des Werkstücks	103
8.1.3	Vergleich des runden und des kantigen Strahlmittels	104
8.2	Vergleich von Druckluft- und mechanischem Strahlen	105
8.2.1	Auftreffwahrscheinlichkeit	105
8.2.2	Aufprallgeschwindigkeit	106
8.2.3	Verformung des Schalenmaterials	109
8.3	Kinetik der mechanischen Beschichtung	111
8.3.1	Einfluß der Strahlzeit auf die Flächenbedeckung	111
8.3.2	Einfluß des Strahlwinkels auf die Flächenbedeckung	112
8.3.3	Einfluß der kinetischen Energie auf die Flächenbedeckung	116
8.3.4	Einfluß der Strahlparameter auf das Schichtgewicht	117
8.3.5	Einfluß der Strahlparameter auf die Flächenbedeckung	119

<b>9</b>	<b>Wirkung der Beschichtung bei der Umformung</b>	<b>120</b>
9.1	Phosphatierte Rohteile	120
9.2	Unbeschichtete Rohteile mit Schmiermittel	121
9.3	Mechanisch beschichtete Rohteile	122
9.4	Mechanisch beschichtete Rohteile mit Schmiermittel	123
9.5	Beurteilung des Spiketests	124
9.5.1	Zusammenhang von Spikehöhe und Umformkraft	124
9.5.2	Reibungskoeffizienten	128
9.6	Umweltbeeinflussung und Kosten	131
9.7	Schlußfolgerungen	132
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>134</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b>	<b>147</b>
12.1	Auftrag von Beschichtungen	147
12.2	Verhalten der Beschichtungen bei der Umformung	151
<b>13</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>160</b>

# 1 Einleitung

Bei der Kaltmassivumformung von Stahl entsteht durch große Kräfte und Flächenpressungen hohe Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück. Dadurch kann es zu lokalem Verschweißen der aufeinander gleitenden Oberflächen und nachfolgender Beschädigung sowohl des Werkstücks als auch des teuren Werkzeugs kommen. Die für einen störungsfreien Umformvorgang erforderliche Maßnahme ist üblicherweise eine Phosphatierung des Werkstücks mit nachfolgendem Auftrag eines Schmiermittels. Die Phosphatierung erzeugt eine trennend und als Träger für den Schmierstoff wirkende Beschichtung. Die anfallenden phosphatbelasteten Abwässer stellen ein gravierendes Umweltproblem dar.

Aus diesem Grund sollte in einem von der EU geförderten Projekt ein neues Verfahren zur Oberflächenbehandlung von Werkstücken entwickelt werden, das umweltfreundlich, darüber hinaus aber auch einfach und dadurch produktionssicher sowie kostengünstig ist. Dieses Verfahren beruht auf der Modifikation eines in Japan entwickelten, patentierten mechanischen Verfahrens, bei dem unter Einsatz eines geeigneten Strahlmittels eine Aufrauhung der Oberfläche und gleichzeitig der Auftrag einer metallischen Beschichtung aus Zink erfolgt. Versuche in der umformtechnischen Praxis zeigten, daß diese Beschichtungen in Verbindung mit zusätzlich aufgetragenen Schmiermitteln die erforderlichen tribologischen Eigenschaften gewährleisten könnten. Der Ablauf des Beschichtungsvorgangs, der Einfluß der verschiedenen Parameter, die Struktur der Beschichtungen und das Verhalten der Beschichtung bei der Umformung waren noch weitgehend unbekannt. Die Anforderungen an die Beschichtungen in Bezug auf Menge und Verteilung des Beschichtungsmaterials waren nicht definiert. Miteinander vergleichbare Ergebnisse aus einem Umformvorgang mit reproduzierbaren Einflußgrößen waren nicht verfügbar, so daß sich die Leistungsfähigkeit des Verfahrens im Vergleich zur bisher unverzichtbaren Phosphatierung als Referenz nicht einordnen ließ. Zu klären war weiterhin die Umweltrelevanz des neuen Verfahrens und die Frage, ob die von einem Projektpartner neu entwickelten Strahlmittel ebenfalls oder besser geeignet sind. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, über das Verständnis der Abläufe zur Verbesserung von Leistungsfähigkeit und Prozeßsicherheit des Verfahrens und damit zur Entwicklung einer umweltfreundlichen Alternative zur Phosphatierung beizutragen.

## 2 Literaturübersicht

Die bei der Kaltmassivumformung von Stahl gegebene Gefahr des lokalen Verschweißens von Werkstück und Werkzeug muß durch eine geeignete Oberflächenbeschichtung verhindert werden. Einen Überblick über die Werkzeugbeanspruchung, die Rohteilbeschichtung und die Auftragverfahren, die Methoden der Schichtcharakterisierung und die tribologische Prüfung sowie die Umweltbeeinflussung gibt die folgende Literaturübersicht.

### 2.1 Beanspruchungen bei Kaltmassivumformung von Stahl

Die Anforderungen an die Oberflächenbehandlung ergeben sich aus den charakteristischen hohen Flächenpressungen bei der Kaltmassivumformung von Stahl. Ein Großteil der erschienenen umfangreichen Literatur ist in Übersichtsarbeiten von Mayrhofer [1983] und Wagener et al. [1999] zusammengefaßt.

An Rauheitsspitzen treten bei der Kaltmassivumformung lokal Flächenpressungen von bis zu 3 GPa auf (Klocke, Raedt [2000]). Aufgrund der hohen Flächenpressung und geringen Relativgeschwindigkeiten ist ein Schmiermittelträger erforderlich (Lehnert, Hildebrand [1996]). Für die Entwicklung eines Verfahrens zur Oberflächenbeschichtung sind die folgenden Forderungen von Bedeutung: Die Oberflächenbeschichtung muß den metallischen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück möglichst verhindern und gleichzeitig die Umformkräfte senken (Geiger [1982]). Eine zusätzliche Beanspruchung der Oberflächenbeschichtung stellt die Oberflächenvergrößerung durch den Umformvorgang dar. Sie kann zum Beispiel beim Napfrückwärts-Fließpressen den Faktor 20 erreichen. Zunder oder Korrosionsprodukte müssen vor der Umformung unbedingt entfernt werden (Oppen [1984]).

Die Lebensdauer der Werkzeuge liegt in der Größenordnung von  $10^4$  bis  $10^5$  Teilen und wird durch Erreichen einer durch geometrische Maße definierten Verschleißgrenze oder Bruch limitiert (Engel, Hinsel [1995]).

## 2.2 Phosphatierung

Die Kaltmassivumformung von Stahl wurde in größerem Umfang erst möglich, als Singer [1934] eine Phosphatschicht als Schmierstoffträgerschicht verwendete und so ein Ersatz für die aufwendige Schmelztauchbeschichtung mit metallischen Überzügen aus Kupfer oder Blei zur Verfügung stand. Seitdem hat sich die Schmierungstechnologie im Prinzip nur wenig verändert (Bartz [1980]; Lahoti, Pauskar [2000]). Die chemische Beschichtung von Rohteilen mit Phosphat und Seife als Oberflächenbehandlung für die Kaltmassivumformung ist in der Literatur ausgiebig beschrieben (Bay [1994]; Geiger [1982]; Haupt [1979]; ICFG [1991]; Mayrhofer [1983]; Oppen [1984]; Vey [1994]). Für die Qualität der Phosphatierung nennt die International Cold Forging Group [1995] in erster Linie die gleichmäßige Ausbildung der Beschichtung auf der Oberfläche des Rohteils.

Das chemische Aufwachsen einer Zinkphosphatschicht ( $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ) führt zu einer vollständigen, flächendeckenden Beschichtung der Rohteile. Es werden Schichtdicken von 5  $\mu\text{m}$  bis 15  $\mu\text{m}$  benötigt, was Schichtgewichten von 10  $\text{g/m}^2$  bis 40  $\text{g/m}^2$  entspricht. Die poröse Phosphatschicht reagiert mit Seifenschmierstoffen, zum Beispiel Natriumstearat. Es werden Zinkseifen mit günstigen Gleiteigenschaften gebildet, die ebenfalls gleichmäßig auf der Werkstückoberfläche verteilt sind. Außerdem verbleibt eine Schicht aus Natriumphosphat auf der Oberfläche. Die Beschichtung aus chemisch aufeinander aufgewachsenen Schichten besitzt eine geringe Scherfestigkeit.

Die Funktionsmechanismen der Phosphatschicht bei der Umformung werden in der Literatur nur unzureichend beschrieben. Renaudin et al. [1990] sowie Geiger et al. [1995] erklären die Wirkung des Schmiersystems mit einem Scheren des Beschichtungsmaterials. Nach Geiger [1982] ist die Gleitwirkung der Phosphatschicht selbst nur von untergeordneter Bedeutung. Viel wichtiger ist, daß sie eine kristalline Struktur mit großer Porosität besitzt, so daß eine phosphatierte Oberfläche bis zu 13 mal mehr Öl als eine blanken Stahloberfläche aufnehmen kann. Auch Festschmierstoffe wie Molybdändisulfid haften auf einer Phosphatschicht besser als auf blankem Stahl.

Haupt [1979] weist auf die Auswirkungen des Gefüges der Werkstücke auf das Aufwachsen der Phosphatkristalle hin. Eine Textur kann die Beschichtung



beeinträchtigen. Die Phosphatkristalle haben parallel zur Werkstückoberfläche eine größere Ausdehnung als senkrecht dazu. Bei mechanischer Belastung verformen sie sich vorzugsweise in Richtung ihrer längsten Achse. Zur Wirkungsweise der Beschichtung mit Phosphat und Seife wird die Hypothese aufgestellt, daß ein Aufschmelzen der Beschichtung eine hydrodynamische Schmierung ermöglichen könnte. Dies widerspricht der Feststellung, daß hohe Temperaturen nur sehr kurzzeitig auftreten. Nach Steenberg et al. [1999] werden beim Napfrückwärts-Fließpressen von rostfreiem Stahl Temperaturen von 450 °C erreicht. Reichelmann [1976] gibt an, daß kurzzeitig Temperaturen von 500 °C entstehen. Kudo und Takahashi [1990] führen eine höhere Werkzeuglebensdauer bei Verwendung von Zink-Kalzium-Phosphat auf die größere Temperaturbeständigkeit gegenüber herkömmlichen Zink-Phosphaten zurück, die in Untersuchungen bei 300 °C über einen Zeitraum von 20 Minuten nachgewiesen wurde. Ein Aufschmelzen der Phosphatschicht kann also ausgeschlossen werden.

Bei der Umformung nimmt die Dicke der Phosphatschicht stark ab. Saiki et al. [1997] untersuchen mit lokalen gravimetrischen Messungen des Schichtgewichts die Korrelation von Schichtmenge und Oberflächenvergrößerung. Die Untersuchungen zeigen, daß die Beschichtung mit Phosphat und Seife sich bei der Umformung ungleichmäßig auf der Oberfläche ausbreiten und nicht direkt der Oberflächenvergrößerung folgen. Die Untersuchung der Oberfläche umgeformter Teile mit der Mikrosonde zeigt keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Oberflächenvergrößerung und der Abnahme des Phosphatsignals (Saiki et al. [1998]). Ein Korrosionsschutz ist durch die Phosphatschicht auch nach der Umformung noch gegeben (Mayrhofer [1983]; Vogel et al. [1996]).

Bei der Entwicklung von Umformverfahren wird die Phosphatierung als Standardprozess vorgesehen, und obwohl sie ständig neuen Verfahren angepaßt und optimiert wird, betrifft dies nur Details des Prozesses, nicht die prinzipielle Verfahrensweise (Nehrenberg, Gothe [1996]; Onodera, Sawai [1994]; Skov-Hansen et al. [1999]; Vasquez et al. [2000]). Versuche, die Umweltfreundlichkeit der Phosphatierung zu verbessern, konnten den Anfall von Sondermüll nicht verhindern (Schmoeckel et al. [1998]).

## 2.3 Schmiermittel

Schmiermittel beeinflussen die Reibungsverhältnisse aufgrund der hohen Flächenpressung bei der Kaltmassivumformung stark. Die Wirkung des Schmierstoffs hängt wesentlich von der Topographie der Oberflächen ab (Batchelor, Stachowiak [1995]). Tiesler und Engel [2000] beschreiben am Beispiel des Kaltfließpressens kleiner Teile die Auswirkungen offener und geschlossener Schmierstofftaschen. Aus zur Seite hin offenen Taschen kann der Schmierstoff dem Druck zwischen Werkzeug und Werkstück ausweichen. Die Flächenpressung konzentriert sich auf deren Kontaktstellen. In geschlossenen Taschen baut sich ein hydrostatischer Druck auf, so daß der Schmierstoff einen Teil der Kräfte aufnimmt. Bei Relativbewegungen ist die Reibung in diesen Bereichen sehr gering und damit auch makroskopisch niedriger. Die Schmierstofftaschen wirken sich in erster Linie bei flüssigen Schmiermitteln aus (Balbach [1988]). Mulki und Mizuno [1996] stellen fest, daß der Einschluß von Schmiermittel und damit die reibungsmindernde Wirkung mit steigender Viskosität zunimmt. Feste Schmierstoffe werden weniger leicht verdrängt (Nakamura [1999]).

Als Festschmiermittel für die Kaltmassivumformung sind Molybdändisulfid und Graphit in Verbindung mit einer Phosphatschicht Gegenstand verschiedener Untersuchungen (zusammengefaßt in Mayrhofer [1983]). Molybdändisulfid und Graphit eignen sich aufgrund der plättchenartigen Struktur durch das leichte Abgleiten der Plättchen aufeinander. Gleichzeitig ist der Widerstand gegen das Eindringen der Rauheitsspitzen der Reibpartner in die Plättchen hoch und die Schmiermittel können große Flächenpressungen übertragen. Gegenüber der Kombination mit Seife bieten sie den Vorteil, daß zum Auftrag keine chemischen Bäder nötig sind. Die Verteilung der physikalisch gebundenen Schmiermittel ist jedoch weniger gleichmäßig. Um die Verteilung zu verbessern, verwendet Vetter [1977] den Auftrag von Molybdändisulfid in wäßriger Suspension. Die Phosphatierung ist weiterhin erforderlich.

Bay [1994] gibt einen Überblick über die für verschiedene Kaltumformverfahren verwendeten Schmiersysteme. Für das Fließpressen und das Drahtziehen werden Phosphatschichten mit verschiedenen Schmiermitteln wie Seife oder Molybdändisulfid beziehungsweise Ölen verwendet. Für das Drahtziehen eignet sich

nach Hillery und McCabe [1995] auch Graphit als Schmierstoff. Dabei ist die Verteilung von großer Bedeutung. Eine Emulsion von Graphit in Wasser als Schmiermittel an Stelle von Ölen ermöglicht in Untersuchungen von Jeong et al. [2001] eine höhere Werkzeuglebensdauer. Für die Halbwarmumformung wird Graphit in wässriger Suspension in größerem Umfang als bei der Kaltmassivumformung verwendet (Sheljaskow [1993] und [1994]).

## 2.4 Tribologische Prüfung

Zur Prüfung von Schmiermitteln wurden verschiedene Modellversuche entwickelt. Übersichten liegen zum Beispiel von Gräbener [1983]; Kivivuori [1998]; Nakamura et al. [1998] und Wagener et al. [1999] vor. Die Versuche zeichnen sich durch hohe Flächenpressungen aus, die den bei der Umformung auftretenden Werten möglichst nahe kommen sollen.

Die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück ist bei den meisten Modellversuchen geringer als für das Fließpressen typisch. Dagegen weist der Falex-Test mit einem sich zwischen zwei Klemmbacken schnell drehenden Zylinder Relativgeschwindigkeiten und Verschleißwege auf, die um mehrere Größenordnungen über den Geschwindigkeiten und Wegen bei der Umformung liegen (Tamura, Azushima [1993]). Die Flächenpressungen liegen jedoch weit unterhalb der Werte für die Massivumformung. Die gleiche Diskrepanz der Belastungswerte liegt bei dem zur Verschleißprüfung verwendeten Versuch mit einem auf eine rotierende Scheibe gedrückten Stift mit Verschleißwegen von 80 m bis 250 m (Mitterer et al. [1997]) oder Versuchen mit oszillierender Belastung einer Stelle (Persson et al. [2001]) vor.

Lazzarotto et al. [1997, 1998] und Dubois et al. [2002] beschreiben einen Modellversuch zum Drahtziehen. Ein konvexer Probekörper wird unter Druck über eine ebenfalls konvexe Oberfläche gezogen. Es ist die Simulation einer mehrstufigen Umformung möglich. Die Verformung der Berührfläche ist allerdings gering und Flächenpressung und Relativbewegung entsprechen nicht den Verhältnissen bei Kaltmassivumformungen.

Häufig werden Versuche entwickelt, die an speziellen Problemen orientiert sind. Beim Stauchen von Schraubenköpfen beeinflusst beispielsweise die Wahl des Schmiermittels stark die Oberflächenqualität der umgeformten Teile (Monaghan, O'Reilly [1996]). Eine Übertragbarkeit auf andere Umformungen ist dabei nicht gegeben und die Versuche sind für die hier betrachtete Problematik nicht verwendbar.

Verbesserte Modellversuche orientieren sich an den Bedingungen bei der Massivumformung und bieten bessere Übertragbarkeit. Beim Rückwärts-Fließpreßversuch nach Koyama [1993] ist das nur qualitativ beurteilte Auftreten von Kratzern Maß für die Eignung des Schmierstoffs. Hemyari [1999] entwickelte einen Modellversuch aus Stauchen und anschließendem Verfahren der unteren Werkzeugplatte. Maß für die Wirksamkeit der Schmierstoffe sind dabei die für das Verschieben erforderlichen Kräfte. Die Umformung mit Oberflächenvergrößerung und die Messung der Reibung erfolgen nacheinander, womit die Veränderungen während der Umformung nicht erfaßt werden. Der von Nishimura et al. [1995] vorgeschlagene Versuch mit Quer- und gleichzeitigem Rückwärts-Fließpressen besteht aus einem komplizierten Werkstofffluß, bei dem die Ergebnisse nicht mehr einzelnen Flächen zugeordnet werden können.

Ein Modellversuch mit hoher Flächenpressung, Oberflächenvergrößerung und gleichzeitiger Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug ist der Spike-Test nach Isogawa und Kimura [1992]. Eine zylindrische Probe wird von einer mit Rillen versehenen Platte in eine trichterförmige Matrice gedrückt. Die analytische Simulation des Versuchs zeigt, daß die Höhe des geformten Spikes streng von den Reibungsbedingungen zwischen Probe und Matrice abhängt. Geringere Reibung bewirkt größere Spikehöhe. Die Oberflächenvergrößerung erreicht lokal den Faktor 7. Die Spike-Tests zeigen eine gute Korrelation mit den Ergebnissen eines Napfrückwärts-Fließpressens. Gleichzeitig durchgeführte Ringstauchversuche weisen keine Korrelation mit dem Fließpressen auf. Die Ergebnisse des Spike-Tests sind demnach besser auf mit Fließpressen verbundene Massivumformungen übertragbar als beispielsweise die des Ringstauchversuchs (Burgdorf [1967]; Krušič, Kuzman [1993]).

Zur Quantifizierung der Reibung wird der Reibungskoeffizient  $\mu$  verwendet. Eine Finite-Elemente-Berechnung des Spiketests mit Hilfe des Programms Eesy-2-form

(CPM, Herzogenrath) durch Nedschroef [2001] zeigt die Abhängigkeit der Spikehöhe von den Reibungsbedingungen. Es ergeben sich Spikehöhen von 19,5 mm bis 15,1 mm für die maximale Spanne des Reibungskoeffizienten von  $\mu = 0$  bis 0,5 (Probekörper  $\varnothing 25 \times 30$  mm). Bei unveränderter Reibung liefert ein größerer Konuswinkel der Matrize größere Unterschiede in der Spikehöhe.

Verschiedene Untersuchungen zeigen, daß die Reibungskoeffizienten bei anderen Modellversuchen zur Kaltmassivumformung zwischen  $\mu = 0,1$  und 0,15 liegen (Horlacher [1989]; Lazzarotto et al. [1997]; Lippmann, Mahrenholtz [1967]; Rooyen, Backofen [1960]; Wolf [1996]). Das Versagen des Schmierstoffs wirkt sich in Untersuchungen von Dubois et al. [1995] nur in einem geringen Anstieg der Umformkraft aus.

## **2.5 Ansätze für alternative Oberflächenbehandlungen**

Aufgrund der bei der Phosphatierung auftretenden Umweltprobleme wurden verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen, diese zu ersetzen. Für die Beschichtung der Werkstücke wurden viele Trägerschichten und Schmiermittel untersucht. Verschiedene Konzepte verwenden Trägerschichten aus anorganischen Salzen oder einem Polymer und einer Metallseife als Schmierstoff (Schmoeckel et al. [1998]), Beschichtungen auf Basis von Borsalz oder Silikaten (Dubar et al. [1998]), Festschmierstofffilme (Weinhold et al. [1996]) oder einen Polymerfilm als Trockenschmiermittel, der trotzdem eine Phosphatschicht benötigt (Vey [1994]). Diese Verfahren verwenden jedoch wiederum chemische Bäder und verursachen erneut Umweltprobleme. Sakurai und Soga [2001] beschreiben erstmals eine Anlage mit mechanischem Reinigungsstrahlen und anorganischem Salz als Schmiermittel, die erfolgreich in der Serienproduktion eingesetzt wird.

Für die Schmierung sind auch metallische Beschichtungen nutzbar. Vor der Entwicklung der Phosphatierung (Singer [1934]) galten Überzüge aus Kupfer oder Blei als optimale Lösung für die Kaltumformung von Stahl. Schwierigkeiten beim Aufbringen und Entfernen schränkten die Anwendbarkeit jedoch ein (Oppen [1984]). Montmitonnet [2000] stellt fest, daß auch vom Werkstück abgelöste Metallpartikel eine schmierende Wirkung haben können.

Insbesondere hexagonale Metalle, die ein stark anisotropes Reibungsverhalten zeigen, können für die Schmierung geeignet sein, was auf die Anzahl aktiver Gleitsysteme zurückgeführt wird (Buckley, Johnson [1968]). Habig [1968] zeigt ausgehend von den Untersuchungen anderer Autoren, daß hexagonale Metalle bei Gleitreibung kleine Reibungs- und Adhäsionskoeffizienten besitzen. Bei der Umformung verzinkter Bleche ohne zusätzliches Schmiermittel kann die weichere Zinkschicht die Funktion eines festen Schmierstoffs übernehmen (Gronostajski [1995]). Weiche Zinkbeschichtungen bewirken nach einer Untersuchung von Mulki und Mizuno [1996] geringere Flächenpressungen als harte. Das Auftreten von Rissen ist in Zink-Eisen-Beschichtungen stärker ausgeprägt als in Beschichtungen mit reinem Zink (Mizuno, Mulki [1996]).

Ein grundsätzlich anderes Vorgehen als die Beschichtung der Werkstücke stellt die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit des Werkzeugs durch eine Beschichtung der aktiven Elemente dar (Hinsel [1997]; Hortig [2000]; Klocke, Raedt [2000]; Mumme, Jungblut [2000]; Münz et al. [2000]; Pöhlandt [1992]; Pöhlandt et al. [1994]; Rupp [1997]; Schmoeckel et al. [1998]; Steinhoff, Schuleit [2000]). Alle Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen jedoch, daß auf eine Beschichtung der Rohteile nicht verzichtet werden kann.

## **2.6 Mechanische Auftragverfahren**

Um eine Umweltbeeinträchtigung zu vermeiden, bieten sich für den Auftrag von Beschichtungen anstelle der chemischen Bäder mechanische Verfahren an. Physikalische Verfahren wie das PVD-Beschichten sind für die Beschichtung der Werkstücke ungeeignet, da die aufgetragenen Schichten der Oberflächenvergrößerung nicht folgen können und die Auftragverfahren unwirtschaftlich wären (Saiki et al. [2001]).

Die Möglichkeit des Auftrags metallischen Beschichtungsmaterials in einem mechanischen Strahlvorgang ist bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt. Die technische Umsetzung wurde allerdings erst durch Aufschmelzen des Strahlmittels zum Auftrag als Beschichtungsmaterials möglich (Société Nouvelle de

Métallisation [1960]). Das thermische Spritzen ist zum Auftrag korrosions- oder verschleißbeständiger Schichten weit verbreitet.

Strahlvorgänge ohne Aufschmelzen des Strahlmittels werden mit hartem, scharfkantigem Strahlmittel zur Reinigung oder mit hartem, rundem Strahlmittel zur Verfestigung von Oberflächen eingesetzt (Al-Obaid [1995]; Kobayashi et al. [1998]; Widmark, Melander [1999]). Die gestrahlten Oberflächen weisen aber auch interessante Eigenschaften bei Festkörperreibung auf. Der Reibungskoeffizient von durch mechanisches Strahlen aufgerauhten Oberflächen sinkt so lange, bis die Rauheit eingeebnet ist (Fridici et al. [2001]). Die Reibungskoeffizienten von durch mechanisches Strahlen aufgerauhten Oberflächen sind in Untersuchungen von Hu und Dean [2000] beim Fließpressen geringer als die Reibungskoeffizienten von gedrehten oder polierten Proben. Ein Verschweißen mit dem Werkzeug erscheint weniger wahrscheinlich, da die Adhäsion an durch mechanisches Strahlen aufgerauhten Oberflächen nach Untersuchungen von Harris und Beevers [1999] niedriger als an unbehandelten ist. Die Oberflächenrauheit ist dabei nicht allein das entscheidende Kriterium, sondern das Zusammenwirken von Rauheit, Oberflächenenergie und der Anwesenheit von Rückständen des Strahlmittels. Zur Beurteilung des Strahlvorgangs ist nach Griffiths et al. [1996] und Staia et al. [2000] der arithmetische Mittenrauhwert  $R_a$  (DIN 4768) der geeignete Parameter.

Sakurai und Soga [2001] verwenden eine Aufrauhung durch mechanisches Reinigungsstrahlen in Verbindung mit dem anschließenden Auftrag eines anorganischen Salzes als Schmiermittel als Oberflächenvorbehandlung für die Kaltmassivumformung.

Eine rein mechanische Beschichtung mit einem Strahlvorgang wird möglich, wenn die kinetische Energie der Strahlmittelteilchen stark gesteigert wird (Alkhimov et al. [1994]). Ein Strahlmittel aus reinen Zinkkugeln erzeugt allerdings keine Beschichtung, da die Zinkkugeln oder Bruchstücke davon nicht fest auf der Werkstückoberfläche haften. Der Auftrag einer Beschichtung findet nur statt, wenn die kinetische Energie des Strahlmittels auf das Beschichtungsmaterial übertragen wird. Untersuchungen durch Harada et al. [1998] zeigen, daß durch mechanisches Strahlen beispielsweise eine Folie aus Aluminium auf einer Stahloberfläche verschweißt. Mechanisches Strahlen ist also auch als Auftragverfahren für Beschichtungen nutzbar.

Die Kombination des Beschichtungsmaterials mit dem Strahlmittel ist eine große Vereinfachung des Verfahrens. In ersten Versuchen wurden harte Strahlmittelpartikel mit einer Größe von 0,4 mm bis 0,8 mm und einer Geschwindigkeit von mindestens 50 m/s verwendet. Das Schalenmaterial wurde dem eigentlichen Strahlmittel in der Strahlanlage in Pulverform zugegeben und sollte sich auf dessen Oberfläche bei der Umwälzung und Beschleunigung durch die Schleuderräder verteilen (Becker [1965]; Bender-Christensen [1973]). Der Beschichtungserfolg war aber nur gering, da sich das Beschichtungsmaterial nur in geringem Maße mit den Strahlmittelteilchen verbindet und während des Flugs eine Trennung der unterschiedlich dichten Stoffe stattfindet.

## 2.7 Herstellung der Strahlmittel

Für eine effiziente Beschichtung ist es erforderlich, ein Strahlmittel herzustellen, das aus harten Kernen besteht, die von einer weichen Schale des Beschichtungsmaterials umgeben sind. Ein für den Auftrag von Beschichtungen geeignetes Strahlmittel entsteht durch Vermischung von schmelzflüssigem Zink und Eisenpartikeln in einem Gasstrom (Evans, Gesick [1969]).

Eine Weiterentwicklung sieht die Verwendung von Strahlmittelpartikeln mit einem Stahlkern und einer zinkreichen Schale vor (Watanabe et al. [1994]). Die Schale wächst in einer Schmelze aus 96,5 Gew% Zn und 3,5 Gew% Al auf die Stahlkerne auf. Beim Aufprall der Strahlmittelteilchen soll ein Teil der Schale in kleine Stücke zerbrechen, die auf die behandelte Oberfläche aufgetragen werden. Die Härte der Schale soll zwischen 60 HV und 370 HV liegen. Die Teilchen haben eine Größe von 250  $\mu\text{m}$  bis 710  $\mu\text{m}$ . Es werden Schichtgewichte zwischen 40 g/m<sup>2</sup> und 150 g/m<sup>2</sup> erreicht. Die Struktur der Beschichtung wird nicht beschrieben.

Für die Herstellung der Strahlmittel und ihre Eigenschaften ist das System Eisen-Zink maßgeblich, in dem vier zinkreiche Phasen auftreten (Schramm [1937]; Gmelin [1978]). Tabelle 2.1 enthält die Eisen-Zink-Phasen; Bild 2.1 zeigt die Phasengebiete im System Eisen-Zink.  $\delta$  besitzt ein hexagonales Kristallgitter,  $\Gamma$  ein kubisch raumzentriertes und  $\Gamma_1$  ein kubisch flächenzentriertes (Massalski et al. [1986]).  $\delta$  wird in der Literatur häufig als FeZn<sub>7</sub> oder FeZn<sub>10</sub> bezeichnet. Der Homogenitätsbereich



von  $\delta$  reicht von 86,5 at% bis 92 at% Zink bei 530 °C. Das ternäre System Aluminium-Eisen-Zink zeigt eine ausgedehnte Löslichkeit für Aluminium in der  $\delta$  Phase (Petzow, Effenberg [1992]).

Phase	Zusammensetzung [at% Zn]		Vorgeschlagene Stöchiometrie	
				[at% Zn]
( $\delta$ Fe)	0	42	Fe	
$\Gamma$	~ 68	82,5	FeZn <sub>3</sub>	75,0
			Fe <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub>	80,8
$\Gamma_1$	< 75	81	Fe <sub>3</sub> Zn <sub>10</sub>	76,9
$\delta$	86,5	92	FeZn <sub>7</sub>	87,5
			FeZn <sub>10</sub>	90,9
$\zeta$	92,8	94	FeZn <sub>13</sub>	92,9
(Zn)	> 99,9	100	Zn	

Tabelle 2.1 Eisen-Zink-Phasen

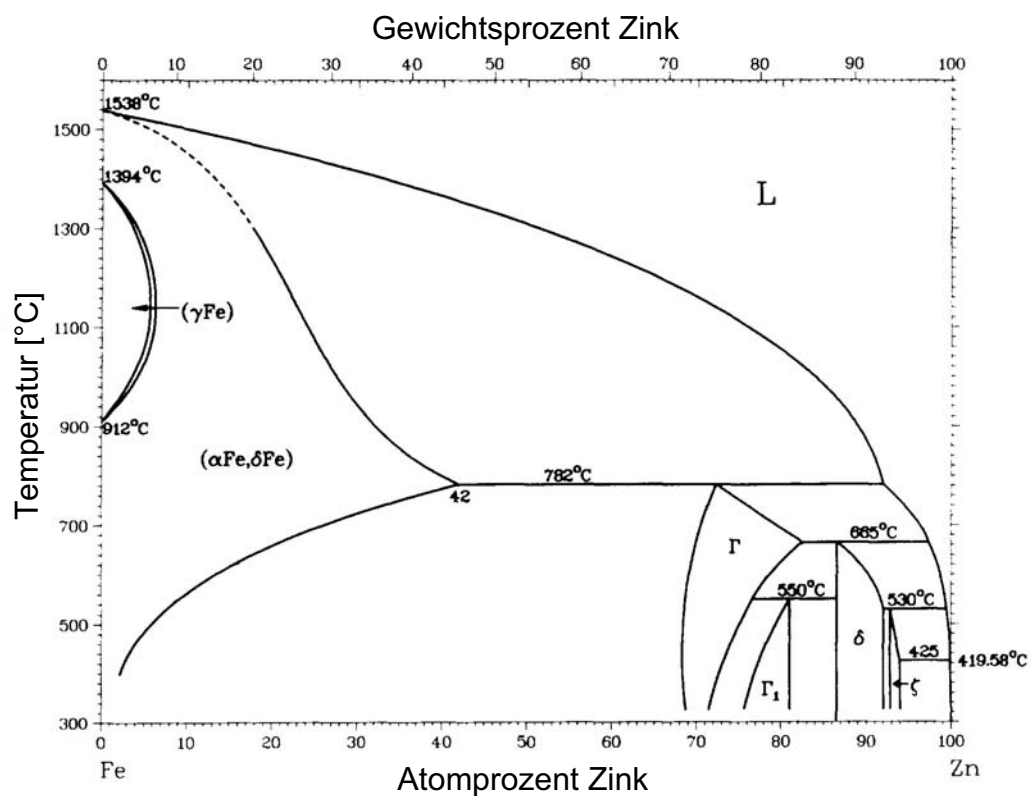


Bild 2.1 System Eisen-Zink (Massalski et al. [1986])

Eisen wird beim Kontakt mit Zinkschmelze angegriffen. Die Geschwindigkeit ist vom Aluminiumgehalt der Schmelze abhängig (Scheil, Wurst [1937]). Einen Überblick über die ablaufenden Reaktionen gibt Franzen [1998]. Beim langsamen Abkühlen oder Glühen ist ebenfalls der Aluminiumgehalt für die Umwandlungsgeschwindigkeit und Phasenbildung maßgeblich (Syahbuddin et al. [1998] und [1999]; Adachi, Arai [1998]). Die Bildung der Phase  $\Gamma$  läßt sich durch die Anwesenheit von Silizium im Stahl verhindern (Scheil, Wurst [1937]). Die Kinetik des Verzinkungsvorgangs von Stahl ist in Gmelin [1978] ausführlich beschrieben. DeWit et al. [2000] untersuchen die Bildung von  $\Gamma$  in Abhängigkeit des Eisengehaltes.  $\Gamma$  beeinflusst wesentlich die mechanischen Eigenschaften der Zink-Eisen-Beschichtungen. Untersuchungen von Franzen [1998] zeigen, daß bei mechanischer Belastung von Zinkschichten auf Stahlsubstraten eine ausgeprägte Tendenz zur Abtrennung der Beschichtung zwischen  $\delta$  und  $\Gamma$ -Phase besteht, wenn die  $\delta$  Schicht gut ausgeprägt ist.

Die Herstellung des im Rahmen des Projektes entwickelten runden Strahlmittels beschreiben Omori und Kieffer [2000]. Es entsteht durch das Einmischen von Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 460  $\mu\text{m}$  in eine Zinkschmelze. Auf die Stahlkerne wachsen zinkreiche Phasen auf. Die Reaktion von flüssigem Zink mit Eisen folgt einem parabolischen Zeitgesetz (Franzen [1998]). Es bildet sich eine Überzugsschicht aus intermetallischen Phasen auf dem Eisen. Die Dicke wird durch die Diffusionsgeschwindigkeit des Zink durch die Überzugsschicht bestimmt. Die Zugabe von Aluminium zur Zinkschmelze verringert dabei die Wachstumsgeschwindigkeit (Scheil, Wurst [1937]). Die Bildung intermetallischer Phasen des Systems Eisen-Zink wird durch die Bildung einer intermetallischen Schicht des Systems Aluminium-Eisen mit einer Dicke von unter 1  $\mu\text{m}$  auf der Eisenoberfläche behindert.

Eine geeignete Temperaturführung bewirkt die Bildung der  $\Gamma$ -Phase nahe dem Stahlkern und der  $\delta$ -Phase in der Schale. Nach der Erstarrung werden die gebildeten Teilchenagglomerate durch Mahlen voneinander getrennt und durch Sieben eine gleichmäßige Größenverteilung abgesondert. Der Zinkschmelze werden inerte Partikel aus Edelstahl zugegeben. Sie sind für die Trennung der Teilchen erforderlich, da bei festeren Brücken zwischen den Schalen die Gefahr besteht, daß die Schale vom Stahlkern abplatzt.

Das kantige Strahlmittel entsteht durch die Reaktion polyedrischer Stahlpartikel mit flüssigem Zink (Omori et al. [1987]). Der Aluminiumgehalt der Schmelze war vermutlich geringer und die Reaktionstemperatur höher als bei der Herstellung des runden Strahlmittels. An einzelnen Stellen der Stahloberfläche entstehen intermetallische Phasen des Systems Aluminium-Eisen-Zink. Zink diffundiert durch diese Schicht in die Korngrenzen des Grundwerkstoffs und bildet intermetallische Phasen mit Eisen. Der Volumenzuwachs zerstört die Schicht. Die entstehende poröse Struktur ist als „Outburst“ bei der Feuerverzinkung von Stahl bekannt (Franzen [1998]).

## **2.8 Methoden zur Schichtcharakterisierung**

Die Charakterisierung von Beschichtungen erfolgt durch die Bestimmung der Zusammensetzung und der Dicke der Schicht. Die verschiedenen Verfahren sind zum Beispiel in Arbeiten von Koch et al. [1994], Kraft und Volkert [2001] oder Löffler [1999] zusammengefaßt. Aufgrund der inhomogenen Struktur der hier untersuchten Schichten ist auch die Verteilung auf der Werkstückoberfläche sowie deren Topographie von besonderer Bedeutung.

Die Zusammensetzung der Beschichtung entspricht der des Schalenmaterials des Strahlmittels. Die Untersuchung kann zum Beispiel mit energiedispersiver Röntgenanalyse erfolgen.

Anstelle der Angabe einer Schichtdicke empfiehlt Kaysser [1972] zur Charakterisierung von Phosphatschichten das Schichtgewicht in  $\text{g/m}^2$ . Die Bestimmung kann gravimetrisch nach DIN EN ISO 3892 oder maßanalytisch nach DIN 50 988 erfolgen. Für die gravimetrische Bestimmung wird das Schichtmaterial abgelöst und seine Masse aus der Gewichts Differenz der Probe errechnet. Bei der maßanalytischen Bestimmung wird die Menge des abgelösten Schichtmaterials durch quantitative chemische Analyse der Lösung ermittelt. Aus dem Schichtgewicht wird bei bekannter Dichte des Beschichtungsmaterials eine mittlere Schichtdicke errechnet. Die Porosität der Schichten soll durch Bestimmung einer „scheinbare Dichte“ berücksichtigt werden (Kaysser [1972]).

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der untersuchten Schichten ist eine lokale Bestimmung der Schichtdicke erforderlich. Die lokale Messung kann in Querschliffen nach DIN EN ISO 2064 oder durch magnetische Verfahren erfolgen. Voraussetzung für die magnetische Messung sind ferromagnetische Eigenschaften des Werkstücks, nicht aber der Beschichtung. Unabhängig von der tatsächlichen Dicke einer Beschichtung ist bei der magnetischen Messung allerdings nur der Abstand der Meßsonde zum ferromagnetischen Untergrund die ausschlaggebende Größe. Weiche Schichten, wie Phosphatschichten, werden durch den Anpreßdruck der Meßsonden beschädigt, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse führt. Außerdem verändert die Rauheit der Werkstückoberfläche die gemessenen Schichtdicken abhängig von deren Größe zwischen 10 % und 50 % (Kaysser [1972]).

Die Richtlinie der International Cold Forging Group (ICFG [1990]) gibt für Phosphatschichten gravimetrische Bestimmung des Schichtgewichts sowie magnetische und elektrische Schichtdickenmessung an. Die elektrische Messung der Schichtdicke durch induzierte Wirbelströme eignet sich nur für elektrisch nicht leitende Beschichtungen auf leitenden Werkstücken. Für die Bestimmung des Schichtgewichts nach der Umformung kommt ebenfalls die gravimetrische Methode zur Anwendung (Saiki et al. [1997]).

Viele in der Literatur beschriebene Methoden zur Schichtcharakterisierung setzen weitgehend homogene, geschlossene Beschichtungen voraus und sind daher für die untersuchten Schichten nicht anwendbar, wie zum Beispiel die Bestimmung mechanischer Eigenschaften aus Härtemessungen (Nakamura et al. [2000]), die Haftfestigkeitsprüfung (DIN EN ISO 2819) durch Abziehen der Beschichtung oder optische Verfahren zur Messung der Schmiermittelfilmdicke (Hermann, Hildebrand [1996]). Eine Untersuchung der Verteilung des Beschichtungsmaterials ist jedoch nicht beschrieben.

Zur Quantifizierung der Topographie der Oberflächen, die für die Wirkung des Schmierstoffs entscheidend ist, dient die Messung der Oberflächenrauheit. Zweidimensionale Vermessung kann die für die tribologischen Eigenschaften entscheidenden Charakteristika nur zum Teil erfassen, da nicht erkannt wird, ob eine Vertiefung seitlich abgeschlossen oder offen ist (Pfestorf et al. [1997]; Schmidt et al. [1987]). Eine dreidimensionale Messung erfordert jedoch hohen Aufwand (Sobis [1996]).

## 2.9 Umweltbeeinflussung

Die verschiedenen, durch die Phosphatierung verursachten Umweltprobleme sind in Crafoord [1990] und ICFG [1991] zusammengefaßt. Es ist sowohl der Schutz des Personals vor gesundheitsschädlichen Dämpfen und Flüssigkeiten als auch die Entsorgung umweltschädlicher Abwässer und Abfallstoffe erforderlich. Die Umweltbeeinträchtigung durch die Phosphatierung erscheint bei der Neuplanung von Anlagen nicht mehr akzeptabel (Sakurai, Soga [2001]).

Das in dieser Arbeit untersuchte mechanische Beschichtungsverfahren verursacht Staub. Für das häufig eingesetzte Reinigungsstrahlen weist die International Cold Forging Group auf die durch Staubemissionen entstehende Gefährdung bei mechanischen Strahlvorgängen hin (ICFG [1995]). Die maximale Staubkonzentration in der Luft am Arbeitsplatz unterliegt einem von der chemischen Zusammensetzung und der Gesetzgebung abhängigen Grenzwert. Die Gesundheitsgefährdung hängt jedoch nicht nur von der üblicherweise bestimmten Menge ab, sondern steigt durch zunehmende Lungengängigkeit auch mit abnehmender Größe und scharfkantiger Form der Staubpartikel an.

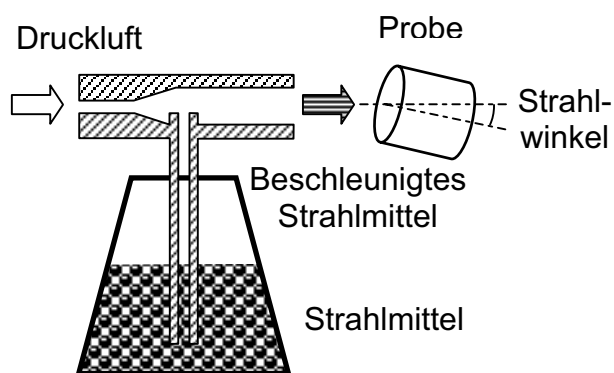
Ein zur größenselektiven Sammlung von Staubteilchen geeigneter Impactor wurde von Weber [1997] entwickelt. Eine kalibrierte Membranpumpe saugt einen definierten Volumenstrom der Umgebungsluft durch ein System von Kammern. In diesen Kammern beschleunigt jeweils eine Düse den Luftstrom mit den darin enthaltenen Staubteilchen in Richtung eines Probensammlers aus Acrylglas. Der Luftstrom trifft auf den Probensammler, wobei geeignete Wahl von Düsenöffnung und Geometrie die Anlagerung der Staubteilchen bis zu einer bestimmten Größe bewirken. Kleinere Teilchen folgen dem Luftstrom um den Probensammler und werden in einer nachfolgenden Stufe abgeschieden.

Die Messung von Partikeln mit einer Größe von 25 µm und 100 nm in mehreren Stufen beschreiben Ebert et al. [1997]. Die Bestimmung von Größe und Form der abgeschiedenen Staubpartikel erfolgt rasterelektronenmikroskopisch. Die chemische Zusammensetzung wird mit Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt.

## 3 Versuchsdurchführung

### 3.1 Auftrag von Beschichtungen

Zur Untersuchung des Strahlvorgangs und des Einflusses verschiedener Strahlparameter wurde ein Modellversuch mit kontrollierten Bedingungen mit einer manuellen Strahlpistole durchgeführt. Das Modell „Strahlfix staubfrei“ des Herstellers Schneider Druckluft verwendet einen Druckluftstrom zur Beschleunigung des Strahlmittels nach dem Ejektorverfahren (Bild 3.1). Das Strahlmittel wird durch eine Hartmetalldüse mit einem Innendurchmesser von 10 mm gebündelt.



3.1.a Schema



3.1.b Strahlpistole

Bild 3.1 Druckluft-Strahlversuche

Der Abstand zur behandelten Fläche und der Strahlwinkel zwischen der Bewegungsrichtung des Strahlmittels und der behandelten Oberfläche wurden durch den Einsatz von Vorsatzdüsen konstant gehalten. Nach dem Aufprall auf die Werkstückoberfläche gelangt das Strahlmittel in einen getrennten Sammelbehälter. Die Energie des Strahlmittels wird durch den Luftdruck bestimmt. Ab einem Druck von 3 bar reicht die Sogwirkung des Luftstromes aus, um das verwendete Strahlmittel durch den Ejektor anzusaugen. Die Obergrenze des Luftdrucks betrug bei den durchgeführten Versuchen 6 bar. Die Zeit, während der die Probenoberfläche dem kontinuierlichen Aufprall von Strahlmittelteilchen ausgesetzt ist, wird als Strahlzeit bezeichnet.

Für die Druckluft-Strahlversuche wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Höhe von 18 mm aus dem Stahl C15, der Aluminiumlegierung AlMg3 und technisch reinem Kupfer hergestellt. Die Zusammensetzungen laut Werkstoffdatenblättern sind in Tabelle 3.1 angegeben. Stahl und Kupfer lagen als gewalzte Rundprofile mit 20 mm beziehungsweise 25 mm Durchmesser, die Aluminiumlegierung als Walzplatte mit einer Dicke von 30 mm vor. Zur Einstellung eines definierten Ausgangszustandes der Oberfläche wurde eine Stirnseite der Proben mit SiC-Naßschleifpapier der Körnungen 180 bis 1200 plan geschliffen und anschließend mit Diamatsuspension der Körnung 3 µm poliert. Zusätzlich wurden Proben aus Stahl mit Stahlkies gestrahlt (3 bar, 90°, 60 Sekunden) und anschließend mit Kochsalzlösung (5 %) bei Raumtemperatur über 300 Stunden korrodiert.

Der Einfluß der Strahlparameter wurde durch Variation von Strahlmittel, Strahlzeit, Strahlwinkel, und Luftdruck mit Stahl, Aluminium und Kupfer als Probenwerkstoffen untersucht (Tabelle 3.2). Bei jedem Strahlversuch kam neues Strahlmittel zum Einsatz. Zusätzlich wurden Versuche mit stetigem Umlauf des Strahlmittels auf Stahl und Kupfer durchgeführt (Tabelle 3.3).

Resultate der Strahlversuche stellen jeweils Mittelwerte aus mindestens drei Einzelversuchen dar, wobei Messungen an mindestens drei verschiedenen Stellen der Oberfläche durchgeführt wurden. Der Durchmesser der behandelten Fläche liegt in Abhängigkeit von Vorsatzdüse und Strahlwinkel zwischen 10 mm und 20 mm. Am Rand dieses Bereichs geht auf einer Breite von 3 mm der beschichtete in den unbeschichteten Bereich über. Die Untersuchung der aufgetragenen Beschichtung wurde im mittleren Bereich (innerhalb eines Radius von etwa 5 mm um den Mittelpunkt der Stirnfläche) durchgeführt.

Geschlossene zinkreiche Beschichtungen mit gleichmäßiger Schichtdicke wurden galvanisch hergestellt. Die galvanische Verzinkung der Proben aus C 15 führte die Firma Atotech in Berlin durch. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Beschichtungen. Um eine gleichmäßige Schichtdicke auf der gesamten Oberfläche zu erzeugen, wurden die Proben in den Bädern intensiv bewegt. Zur Befestigung wurde ein Innengewinde M4 in die ebenen Stirnflächen geschnitten.

Kohlenstoffstahl C15							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,12-0,19	0,17-0,37	0,35-0,55	≤ 0,035	≤ 0,04	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,25

Aluminiumlegierung AlMg3						
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
0,5	0,5	0,05	0,001 – 0,4	1,5 - 2,5	0,1	0,001 – 0,2

Kupfer E Cu-57	
Cu	O
> 99,9	0,005 - 0,040

Tabelle 3.1 Nennzusammensetzung der verwendeten Werkstoffe (Gew%)

Werkstückwerkstoff	Strahlwinkel	Luftdruck [bar]	Strahlzeit [s]
Kohlenstoffstahl C15	20°	3	10
			30
			60
	45°		10
			30
			60
	90°		10
			30
			60
			120
			180
			240
			300
		5	10
			30
	60		
Aluminiumlegierung AlMg3	90°	3	10
			30
			60
Kupfer E Cu-57	90°		10
			30
			60

Tabelle 3.2 Parameter der Druckluft-Strahlversuche mit rundem Strahlmittel



Werkstückwerkstoff	Strahlwinkel	Luftdruck [bar]	Strahldauer [s]	Strahlmittel
Kohlenstoffstahl C15	90°	6	180	unbenutzt
			360	
			480	
Kupfer E Cu-57	90°	6	400	unbenutzt
			400	benutzt

Tabelle 3.3 *Parameter der Druckluft-Strahlversuche mit rundem Strahlmittel in stetigem Umlauf*

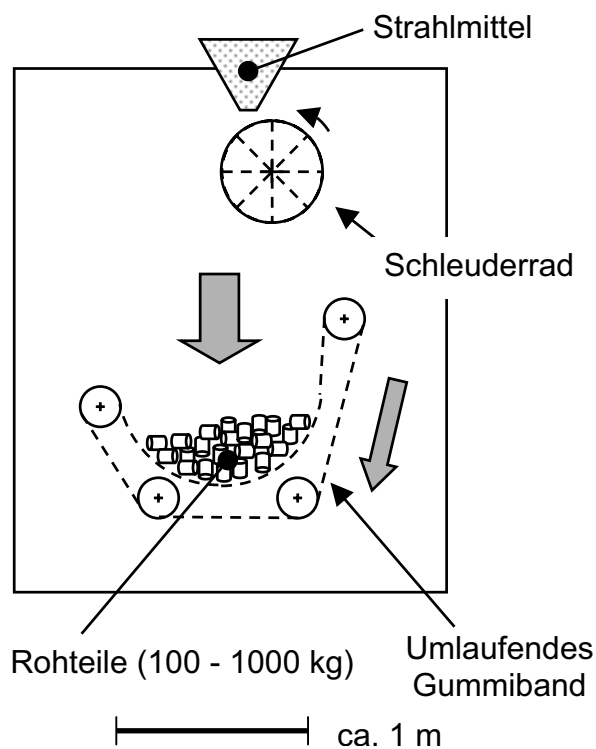
Beschichtung	Handelsname	Zusammensetzung	Beschichtungs- zeit [min]	Schichtdicke [µm]
Zn (sauer)	Zylite HT	Zn	10	8,7-12,4
Zn (alkalisch, cyanfrei)	Protolux 3000	Zn	30	9,4-10,5
Zn/Fe	Protedur Plus	Zn, 0,5-0,8 Gew% Fe	7	1,8-2,3
Zn/Fe	Protedur Plus	Zn, 0,5-0,8 Gew% Fe	15	4,7-5,3
Zn/Fe	Protedur Plus	Zn, 0,5-0,8 Gew% Fe	30	9,5-10,9
Zn/Ni	Protedur NI75	Zn, 13-15 Gew% Ni	40	9,1-11,4

Tabelle 3.4 *Galvanisch aufgebrachte Beschichtungen*

Für den Auftrag von Beschichtungen durch mechanisches Strahlen in industriellem Maßstab kamen im Projekt Strahlanlagen zum Einsatz, die aus zum Reinigungsstrahlen verwendeten Anlagen entwickelt wurden (Bild 3.2). Turbinenräder schleudern das Strahlmittel auf eine Charge aufeinander liegender Werkstücke, zum Beispiel Rohteile für die Umformung, die durch ein umlaufendes Gummiband stetig umgewälzt werden. Gebrauchtes Strahlmittel gelangt wieder in den Kreislauf, nachdem ein Magnetabscheider die Stahlkerne, die den größten Teil ihrer Zinkschale verloren haben, entfernt hat. Siebe trennen kleine, nicht mehr verwendbare Bestandteile ab. Einstellbare Strahlparameter sind die Strahldauer für die gesamte Charge und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder.

Tabelle 3.5 enthält die technischen Daten der im Rahmen des Forschungsprojektes verwendeten mechanischen Strahlanlagen. Die Anlagen bei der Firma Acheson und der Firma Hirschvogel sind zur Beschichtung von Rohteilen konzipiert und unterscheiden sich in ihrer Größe und in der Art des verwendeten Strahlmittels. Die Anlage bei der Firma Ascoforge dient zur Beschichtung von Draht, der kontinuierlich

zwischen drei Schleuderrädern, die im Winkel von  $60^\circ$  zueinander angeordnet sind, durchläuft.



3.2.a Funktionsweise der mechanischen Strahlanlagen



3.2.b Strahlanlage bei der Firma Acheson

Bild 3.2 Industrielle Strahlanlage

Strahlanlage	1 (Firma Acheson)	2 (Firma Hirschvogel)	3 (Firma Ascoforge)
Charge	10-100 kg	900 kg	Draht
Größe der Werkstücke	10-500 mm	50-500 mm	$\varnothing$ 5,5-25 mm
Gewicht der Werkstücke	10 g-10 kg	0,5-10 kg	Coil
Turbinen	1 x $\varnothing$ 300 mm	2 x $\varnothing$ 400 mm	3 x $\varnothing$ 364 mm
Turbinendrehzahl	0 - 3000 /min	0 - 2900 /min	0 - 3000 /min
Strahlmitteldurchsatz	35 kg/min	300 kg/min	330 kg/min
Strahlzeit / Vorschub	variabel	20 min	1 - 30 m/min
Strahlmittel	Rund	Kantig	Rund

Tabelle 3.5 Technische Daten der mechanischen Strahlanlagen

Der Einfluß der Strahlparameter auf den Beschichtungsvorgang in mechanischen Strahlanlagen wurde durch Variation von Chargenmenge, Strahlmitteldurchsatz und Zusammensetzung, Strahlzeit und der Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder untersucht. Die Angaben zu den einzelnen Versuchsreihen enthalten die Tabellen 12.1 bis 12.8 im Anhang (Kapitel 12).

Zur Ermittlung des Einflusses der Form der Rohteile wurden Versuche mit unterschiedlichen Verhältnissen von Durchmesser und Länge der Rohteile durchgeführt (Tabelle 12.1, Geometrie 1 bis 5). Zur Bestimmung des Einflusses der Oberflächenrauheit wurden Rohteile der Geometrie 1 vor der Strahlbehandlung mit Schleifpapier der Körnung 400 geschliffen und anschließend zusammen mit den übrigen, reinigungsgestrahlten Teilen beschichtet.

Bei der Beschichtung von Draht in Strahlanlage 3 fand die Beeinflussung des Strahlvorgangs durch Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit des Drahtes und der Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleuderräder statt (Tabelle 12.9).

### **3.2 Untersuchung von Strahlmitteln und Beschichtungen**

Zur Untersuchung der Strahlmittel und der beschichteten Proben wurden metallographische Schliffe angefertigt. Die Strahlmittel wurden mit Ethanol gereinigt und mit kalt aushärtendem Epoxidharz (Struers Specifix 20) vermischt. Bei innerhalb der untersuchten Probe variierender Korngröße im Fall der verbrauchten Strahlmittel wurde beim Durchmischen darauf geachtet, daß ein repräsentativer Querschnitt der vorhandenen Körnungen in der späteren Sichtfläche liegt. Die Proben wurden auf SiC-Naßschleifpapier (Körnung 180 bis 2400) geschliffen und mit Diamant-suspensionen (3 µm und 1 µm) poliert.

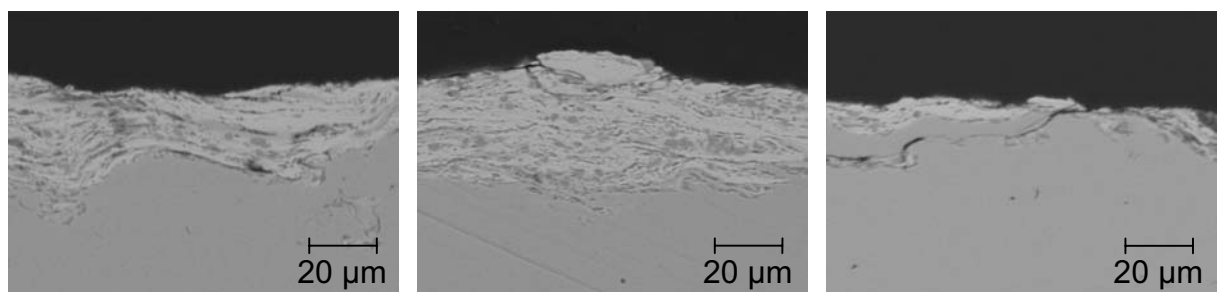
Das Gefüge der Strahlmittel wurde lichtmikroskopisch und mit einem Rasterelektronenmikroskop (Zeiss DSM 962) untersucht. Um die verschiedenen Gefügebestandteile sichtbar zu machen, kamen bei den lichtmikroskopischen Untersuchungen Polarisationsfilter zum Einsatz. Weiterhin wurden diese Proben farbgeätzt. Eine Lösung aus 2 ml 10 %-iger wässriger Salpetersäure, 2 ml 4 %-iger ethanolischer Pikrinsäure und 40 ml Ethanol bewirkt beim Eintauchen der Proben für etwa 10 Sekunden eine Dunkelfärbung der Zink-Eisen-Phasen  $\Gamma$  und  $\Gamma_1$ . Eisen,  $\zeta$  und

$\delta$  bleiben unverändert. Die Färbung wechselt von blau zu braun und ist nicht scharf abgegrenzt, eignet sich jedoch zur eindeutigen Lokalisierung der Phasen  $\Gamma$  und  $\Gamma_1$ .

Die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Bereiche der Strahlmittel wurde mit energiedispersiver Röntgenspektrometrie (EDX, Noran Voyager) und die Gesamtzusammensetzung der Strahlmittel mit Röntgenfluoreszenzanalyse (Spectro X-Lab 2000) ermittelt. Die RFA-Messung erfolgte an etwa 80 Strahlmittelpartikeln auf einer Fläche von 8 x 10 mm. An zerbrochenen Strahlmittelpartikeln werden auch im Inneren liegende Bestandteile erfaßt und so die Gesamtzusammensetzung der Partikel einschließlich Schale und Stahlkern bestimmt.

Die in den Strahlmitteln enthaltenen Phasen wurden mit Röntgenbeugung bestimmt (Siemens D500). An etwa 40 Strahlmittelpartikeln wurde eine Messung über einen Winkelbereich von 5° bis 135° vorgenommen. Die Messung an zerbrochenen Strahlmittelpartikeln liefert Informationen aus dem Teilcheninneren.

Die Härte der verschiedenen Bereiche der Strahlmittelteilchen wurde mit einem Vickers-Härteprüfer (Leco M400-G2) mit einer Last von 1 kg gemessen. Die angegebenen Härtewerte sind Mittelwerte aus jeweils mindestens fünf Messungen.



3.3.a *Vor Präparation  
eingebettete  
Probe*

3.3.b *Ohne Ultraschall  
präparierte  
Probe*

3.3.c *Beschädigung  
durch Reinigung  
mit Ultraschall*

Bild 3.3 *Ergebnis unterschiedlicher Präparationsverfahren*

Die auf beschichteten Proben vorhandenen Schichten haften nicht fest an der Oberfläche und werden daher bei der metallographischen Präparation leicht beschädigt oder abgetragen. Vor der Präparation durch Einbettmasse geschützte und durch trockenes Sägen getrennte Proben weisen eine Schichtdicke von 10 µm auf (Bild 3.3.a). Durch Untersuchung von Querschliffen und Aufsichten von Proben,

die mit einem wassergekühlten Trennschleifer getrennt wurden, konnte festgestellt werden, daß keine Beeinflussung der Beschichtung durch das Kühlwasser stattfindet (Bild 3.3.b). Eine Reinigung der Proben mit Ultraschall ist zu vermeiden, da ein Abtrag der Beschichtung stattfindet (Bild 3.3.c). Für das Schleifen und Polieren der beschichteten Proben kam, wie bei den Strahlmitteln, SiC-Naßschleifpapier (Körnung 180 bis 2400) beziehungsweise Diamantsuspension (3 µm und 1 µm) zur Anwendung.

Das Gefüge der Beschichtungen wurde rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Für die Elementanalyse fand zusätzlich zu Rasterelektronenmikroskopie und EDX mit Elektronenstrahlmikroanalyse (ESMA) mit wellenlängendispersiver Spektrometrie (Cameca Camebax SX 50) mit einer Beschleunigungsspannung von 20 kV statt.

Die Analyse der auf den beschichteten Oberflächen vorhandenen Elemente wurde mit Sekundärionen-Massenspektroskopie (Cameca IMS 5F) mit Sauerstoff ( $O_2^+$ ) Primärionen und der Detektion der positiven Sekundärionen durchgeführt. Die effektive Beschleunigungsspannung betrug 8 kV. Bei den gewählten Einstellungen ist die Massenauflösung  $R = M/\Delta M$  mit 300 niedrig. Die Untersuchung erfolgte auf einer Probenfläche von jeweils 100 x 100 µm<sup>2</sup>, wobei das Signal des inneren Bereichs mit einem Durchmesser von 60 µm detektiert wurde. Zusätzlich zum Signal des Eisens, das auch im Beschichtungsmaterial enthalten ist, wurde das nur im Werkstück vorhandene, gut ionisierbare Chrom gemessen. Zur Bestimmung der Meßtiefe diente ein Profilometer (Sloan Dekatak IIA).

Ein tragbares Profilmessgerät (Mahr Perthometer M2) diente zur Ermittlung der Oberflächenrauheit beschichteter Oberflächen nach dem mechanischen Tastschnittverfahren. Die Meßstrecke betrug  $L_t = 5,6$  mm nach DIN 4768.

Eine berührungslose Vermessung des Oberflächenprofils fand mit einem Laser-Profilometer (OM Engineering Polaris) statt. Die laterale Auflösung liegt bei 1 µm. Ein konfokales Lasermikroskop (ICM 1000) wurde von der Firma Leica zur Verfügung gestellt.

Die Menge des aufgetragenen Beschichtungsmaterials wurde gravimetrisch bestimmt. Aus der Größe der beschichteten Oberfläche  $A_B$  und dem Gewicht der Proben vor ( $M_P$ ) und nach ( $M_0$ ) dem Ablösen des Beschichtungswerkstoffs vom Stahl

mit 20 %iger Natronlauge bei 60 °C ergibt sich das Gewicht der abgelösten Schicht  $M_A$ . Die Angabe des Schichtgewichts erfolgt als Gewicht [g] pro Flächeneinheit [m<sup>2</sup>]:

$$m_s = \frac{M_A}{A_B} = \frac{M_P - M_L}{A_B} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]$$

Für das Ablösen der Beschichtung von Proben aus Aluminium wurde eine Lösung von 5 ml HCl (30 %) in 500 ml Wasser verwendet. Alle Gewichte sind Mittelwerte von mindestens drei Wägungen.

Um die Beeinträchtigung der Beschichtungen durch Umwelteinflüsse, zum Beispiel bei Lagerung vor der Umformung, festzustellen, wurde die Anfälligkeit für Korrosion untersucht. Mechanisch beschichtete und phosphatierte Proben wurden für 400 Stunden in einer Salzsprühkammer 5 %iger NaCl-Lösung bei 20° C ausgesetzt. Zusätzlich wurden mechanisch beschichtete Proben über zwei Wochen einmal täglich mit 5 %iger NaCl-Lösung besprüht, um eine Lagerung im Freien zu simulieren. Um die Beeinflussung der Beschichtungen durch den Auftrag von Schmiermitteln aus wässriger Suspension festzustellen, wurden außerdem Beschichtungen vor und nach dem Auftrag untersucht.

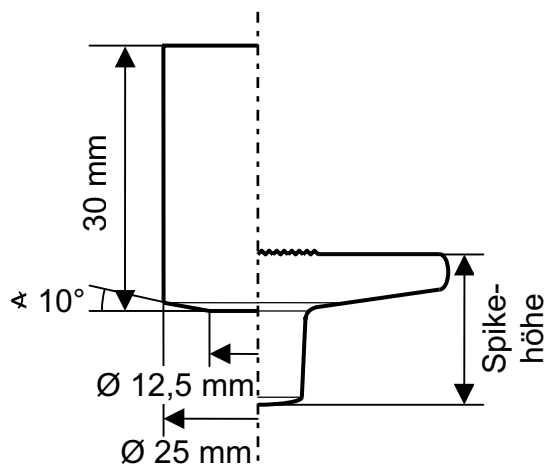
### 3.3 Verhalten der Beschichtungen bei der Umformung

Zur Bestimmung der Einflüsse der Beschichtungen bei der Kaltmassivumformung kamen der Spiketest und Vorwärtsfließpressen als Modellversuche zum Einsatz. Beim Spiketest ist die Länge des in axialer Richtung geflossenen Zapfens, die Spikehöhe, das Kriterium für die Qualität der Schmierung. Die verwendeten Werkzeuge zeigt Bild 12.1 (Kapitel 12). Es kamen Werkzeuge mit einem Konuswinkel für die Spikespitze von 1° und 3° (Bild 12.1) zur Anwendung.

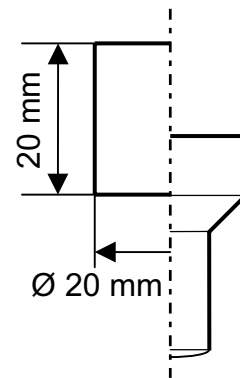
Die Geometrie der Proben für die Umformversuche (Bild 3.4) ergibt sich aus der Auslegung der Werkzeuge. Die Proben wurden als Drehteile aus Rundmaterial hergestellt und erhielten anschließend die jeweilige Oberflächenbehandlung. Vor der Umformung wurde die Matrize mit Ethanol gereinigt, um Rückstände des Schmiermittels vorangegangener Versuche zu entfernen. Ein über die Matrize

schwenkbarer Anschlag gewährleistet beim Einsetzen der Probe ihre Zentrierung. Der Winkel der Stirnfläche des Probenkörpers entspricht dem Trichterwinkel.

Zur Ermittlung der Spikehöhe wurde in dieser Arbeit ein spezielles Meßgerät konstruiert (Bild 3.5). Es wird auf den schrägen Teller des Spikes aufgesetzt und ermöglicht die Messung unabhängig von der nicht ebenen Oberseite. Der Konus an der Unterkante des Zylinders entspricht mit einem Winkel von  $10^\circ$  dem Trichterwinkel und damit dem des Spiketellers. Am oberen Ende des Zylinders nimmt eine Klemmvorrichtung eine Meßuhr auf. Zur Kalibrierung des Meßgeräts dienen der Geometrie der Spikes entsprechende Normale. Eine Abstufung von 2 mm ermöglicht mit einem Meßbereich der Meßuhr von 2 mm eine Spikehöhenmessung von 17 mm bis 23 mm Gesamthöhe.



3.4.a Spiketest



3.4.b Vorwärtsfließpressen

Bild 3.4 Probengeometrie für die Umformversuche

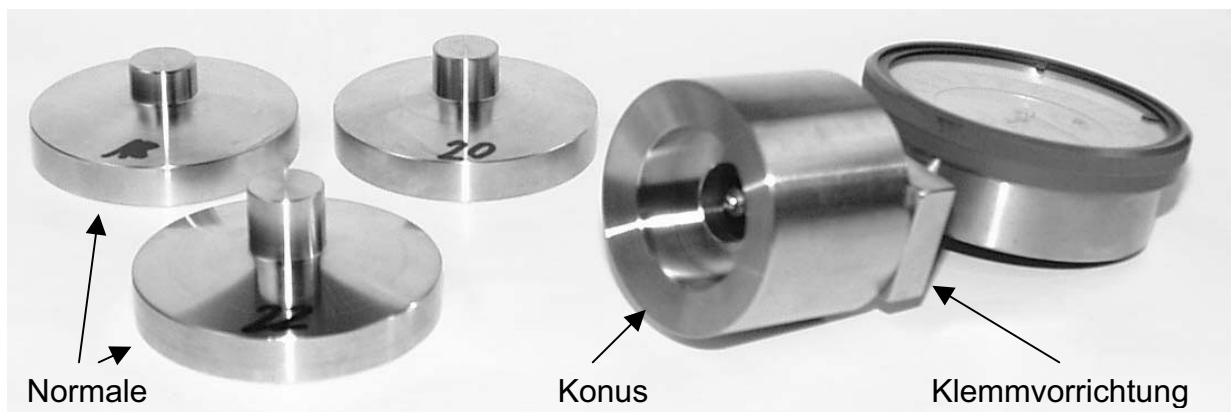


Bild 3.5 Spikehöhen-Meßgerät

Beim Vorwärtsfließpressen wird ein zylindrischer Probekörper von einem Stempel aus einer geschlossenen Matrize über eine Kegelfläche durch eine Düse gedrückt. Maß für die Qualität der Schmierung ist dabei die Maximalkraft. Bild 12.2 (Kapitel 12) zeigt die verwendeten Werkzeuge.

Für beide Modellversuche stand eine mechanische Kniehebelpresse (Maypress MKN 2-600) zur Verfügung. Die technischen Daten enthält Tabelle 12.10 im Anhang (Kapitel 12). Zur Messung der Preßkraft dienen Dehnmeßstreifen an den beiden Hauptzugstreben der Presse. Zusätzlich erfolgte eine Wegmessung und eine pyrometrische Messung der Temperaturerhöhung der Proben durch den Umformvorgang.

Serie	Modellversuch	Einfluß von	Parameter in Tabelle (Kapitel 12)
A	Spikettest	Rohteilgröße	12.11
B		Konuswinkel	12.12
C		verschiedenartigen Schmiermitteln	12.13
D		mechanischer Beschichtung mit rundem und kantigem Strahlmittel	12.14
E		galvanisch aufgetragenen geschlossenen zinkreichen Beschichtungen	12.15
F		Preßgeschwindigkeit	12.16
G		Schmiermittelmenge	12.17
H		Gesenkschmiermittel	12.18
J	Vorwärtsfließpressen	mechanischer Beschichtung	12.19
K		Menge der mechanischen Beschichtung	12.20

Tabelle 3.6 *Umform-Modellversuche (Spiketests und Vorwärtsfließpressen)*

Einen Überblick über die durchgeführten Umformversuche gibt Tabelle 3.6. Die einzelnen Parameter der Versuchsreihen enthalten die Tabellen 12.11 bis 12.20 im Anhang (Kapitel 12). Jede Variante umfaßt sieben einzelne Versuche. Die jeweils höchsten und niedrigsten Werte für die Spikehöhe beziehungsweise die Preßkraft beim Vorwärtsfließpressen wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Der Mittelwert der übrigen Resultate ergibt den Wert für die Beschichtungsart. Alle Beschichtungen wurden in den mechanischen Strahlanlagen aufgebracht. Für die Schmiermittel sind die Bezeichnungen des Herstellers Acheson in Klammern



angegeben. Der Auftrag von Graphit als Schmiermittel erfolgte im Wasserbad mit einer Temperatur von 90 °C durch Tauchen.

Querschliffe und Aufsichten umgeformter Proben wurden analog zu denen der beschichteten Rohteile untersucht. Zusätzlich fand eine röntgendiffraktometrische Untersuchung mit streifendem Einfall (Seifert Diffraktometer XRD 3003 PTS) statt, um die Bildung neuer Phasen auf der Oberfläche der Werkstücke während des Umformvorgangs zu überprüfen. Die Bestimmung von geometrischen Maßen und Rauheitskenngrößen erfolgte jeweils durch Messungen an mindestens drei verschiedenen Stellen der Werkstücke.

Ausgehend von den Ergebnissen der Modellversuche wurden gezielt Versuche unter industriellen Bedingungen durchgeführt (Tabelle 12.21, Kapitel 12). Rohteile sowie Draht aus dem normalen Produktionsablauf erhielten an Stelle der üblichen Phosphatierung eine Beschichtung in den mechanischen Strahlanlagen bei den Projektpartnern Acheson, Hirschvogel beziehungsweise Ascoforge. Die Umformversuche fanden bei den Firmen Ascoforge, Hirschvogel, Nedschroef und Sidenor statt. Bei der Umformung aller Teile bei der Firma Hirschvogel außer den Deckeln, bei den Gleichlaufgelenken der Firma Ascoforge und den Schrauben wurde erfahrungsgemäß zusätzlich ein Kaltfließpreßöl als Gesenkschmiermittel eingesetzt.

### **3.4 Untersuchung der Umweltbeeinflussung**

Zur Einstufung der mit dem mechanischen Auftrag verbundenen Emissionen wurde die chemische Zusammensetzung der Strahlmittel und des während des Strahlvorgangs entstehenden Staubs analysiert. Die Untersuchung der Strahlmittel erfolgte mit RFA und Plasmaspektroskopie (ICP-AES, Perkin Elmer 1000). Die Auflösung der Strahlmittel erfolgte in verdünnter Salpetersäure. Nach einer Reaktionszeit von zehn Stunden ungelöste Reste wurden unter langsamer Erwärmung bis zum Siedepunkt und Halten dieser Temperatur für eine Stunde aufgelöst. Bei der Abkühlung fällt Kohlenstoff aus dem Stahl der Kerne als dunkler, flockiger Niederschlag aus.

Zur Bestimmung der Staubemissionen der verschiedenen Strahlanlagen diente ein Impactor (Kapitel 2.9). Ein definierter Volumenstrom der Umgebungsluft wurde durch

ein System aufeinanderfolgender Düsen und Probensammler gesaugt. Die Dauer der Messung betrug je nach Belastung der Luft mit Staubpartikeln zwischen 15 und 30 Minuten. Die Sammlung der in der Luft enthaltenen Partikel erfolgte in fünf nach der Größe getrennten Stufen von 0,1 µm bis größer 25 µm. Die Teilchengröße wurde an rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen, die chemische Zusammensetzung mit T-RFA bestimmt. Es wurden Messungen an den drei Strahlanlagen jeweils am Standpunkt des Bedienungspultes in einer Höhe von 1,5 m über dem Boden durchgeführt. Eine Messung ohne Betrieb der Strahlanlage ermittelt jeweils den aus der Umgebung stammenden Staubanteil, eine zweite während des Strahlbetriebs die Emissionswerte der Anlage. Weitere Messungen fanden am Abluftauslaß der Filteranlagen statt. Die Strahlkammer der industriellen Strahlanlagen ist an eine Absaugung mit Zyklon und Flachfaltenfilter angeschlossen. Eine zusätzliche Messung fand an einer Umformpresse statt, um die Emissionen beim Umformvorgang zu überprüfen.

## 4 Methoden zur Schichtcharakterisierung

Zur Schichtcharakterisierung wurde das Rasterelektronenmikroskop verwendet, da die große Schärfentiefe die Abbildung der rauhen Oberflächen in der Aufsicht und der Ordnungszahlkontrast die Unterscheidung von Beschichtungsmaterial und Werkstück erlaubt. Zusätzlich kommen zur Charakterisierung der Schichten energie- und wellenlängendispersive Röntgenanalyse, Sekundärionen-Massenspektroskopie, mechanische und optische Rauheitsmessung sowie gravimetrische Verfahren zur Anwendung.

### 4.1 Metallographische Querschliffe

In Bild 4.1 sind die beschichteten Bereiche eines Ausschnitts einer behandelten Oberfläche durch Balken oberhalb des Bildes markiert. Informationen über die Struktur der Beschichtung sind bei höherer Vergrößerung zu gewinnen. Durch die Untersuchung vieler einzelner Stellen lassen sich Aussagen über die Verteilung der beschichteten Bereiche gewinnen. Besser geeignet sind jedoch rasterelektronenmikroskopische Aufsichten.

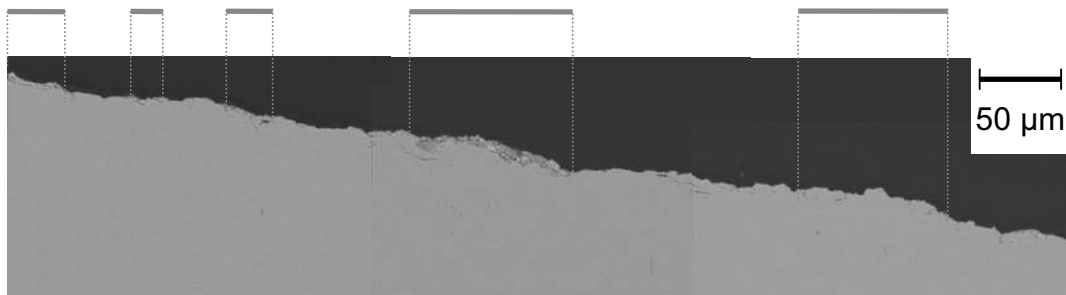


Bild 4.1 *Typisches Erscheinungsbild der mechanischen Beschichtung  
(Zusammenstellung rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen)*

## 4.2 Bestimmung der Flächenbedeckung

Der im Folgenden als Flächenbedeckung  $f_B$  bezeichnete Anteil der Werkstückoberfläche, auf dem sich Beschichtungsmaterial befindet, wurde an rasterelektronenmikroskopischen Aufsichten bestimmt. Im BSE-Signal sind die beschichteten Bereiche als helle Stellen zu erkennen (Bild 4.2.a). Nach dem Laugen des Werkstücks mit 20 %iger Natronlauge für 30 Sekunden ist an dieser Stelle der Oberfläche ein Teil des Beschichtungsmaterials abgelöst (Bild 4.2.b). Die beiden markierten Bereiche zeigen, daß der BSE-Kontrast beschichtete Gebiete zutreffend als helle Stellen darstellt.

Die unterschiedlichen Grauwerte beschichteter und unbeschichteter Bereiche wurden mit einem Programm zur Bildanalyse erfaßt. Während der Aufnahme paßt das Rasterelektronenmikroskop Kontrast und Helligkeit ständig an. Absolute Werte für die Graustufen von Stahl und Beschichtung lassen sich daher nicht bestimmen. Vor der Analyse wurde die Anwesenheit von Zink an charakteristischen Stellen mit EDX überprüft. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird der Grenzwert für die Unterscheidung für jedes untersuchte Bild neu bestimmt.

Die angegebenen Werte für die Flächenbedeckung  $f_B$  sind Mittelwerte von Messungen an drei verschiedenen Stellen und können aufgrund der manuellen Anpassung Fehler bis zu  $\pm 10\%$  aufweisen.

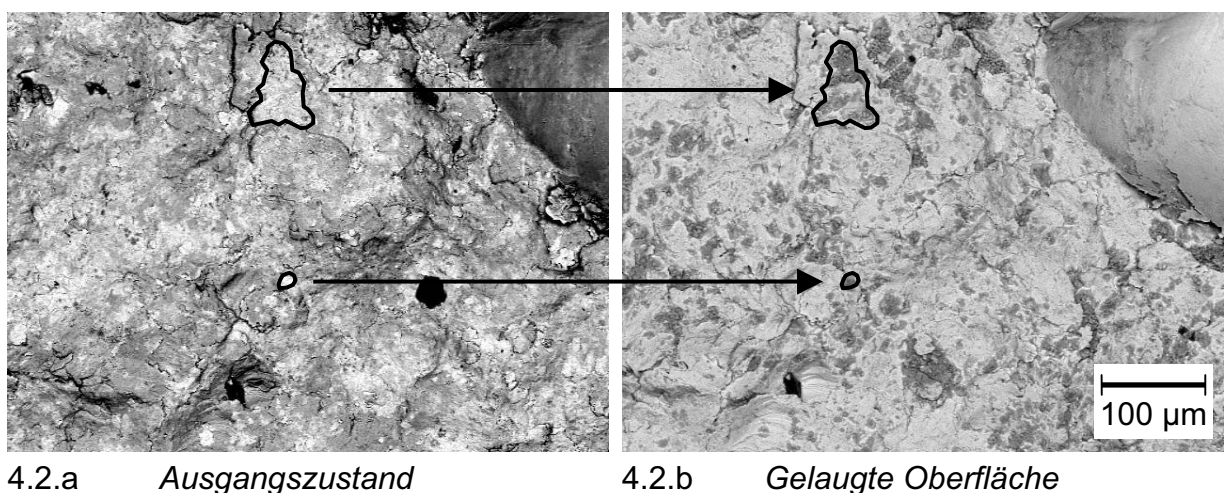
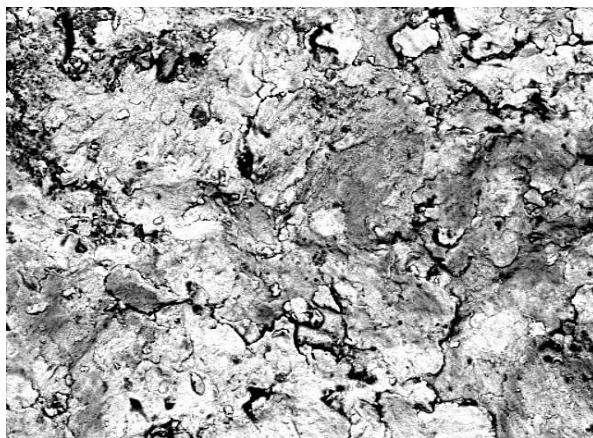


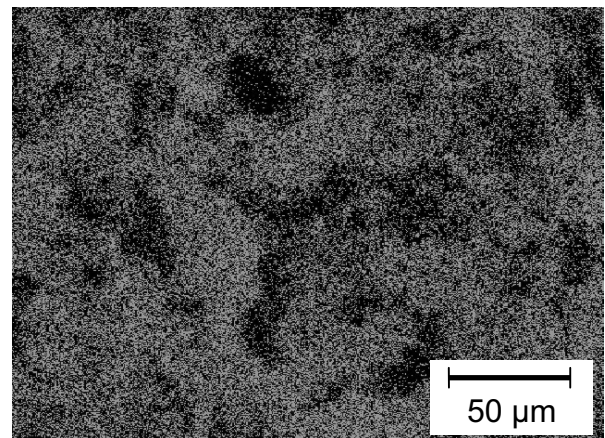
Bild 4.2 *Detektion der Beschichtung (Rasterelektronenmikroskopische Aufsicht, BSE-Signal)*

### 4.3 Elementverteilungsanalyse (EDX und WDX)

Durch Elementverteilungsanalyse des Gehaltes an Zink mit Hilfe der EDX kann die Flächenbedeckung und die Verteilung des Zinks auf den untersuchten Oberflächen erfaßt werden. Bild 4.3 zeigt eine Aufsicht auf eine beschichtete Oberfläche (Bild 4.3.a) und das an derselben Stelle mit EDX gemessene Signal für Zink (Bild 4.3.b). Die laterale Auflösung der EDX-Messung ist auf etwa 1 µm begrenzt.

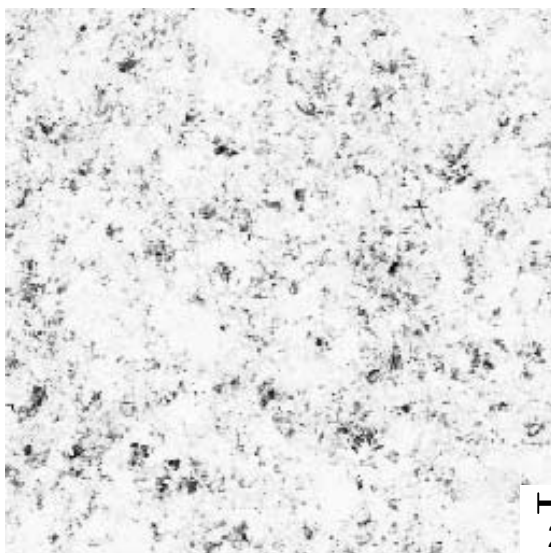


4.3.a BSE-Signal

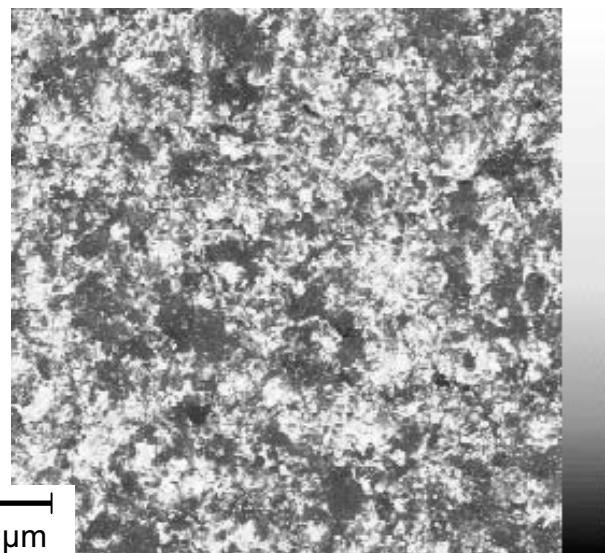


4.3.b EDX-Messung  
(Elementverteilung, Zn-Signal)

Bild 4.3 Untersuchung einer beschichteten Oberfläche mit dem Rasterelektronenmikroskop



4.4.a Zink-Signal



4.4.b Eisen-Signal

Bild 4.4 Untersuchung einer beschichteten Oberfläche mit der Mikrosonde

Bild 4.4 zeigt das mit der Mikrosonde an einer mit rundem Strahlmittel behandelten Probe ( $19 \text{ g/m}^2$ ) gemessene Zink- beziehungsweise Eisen-Signal. Bereiche hoher Intensität im einen Bild entsprechen Bereichen geringerer Intensität im anderen. Die Verteilung des Beschichtungsmaterials wird in gleicher Weise wie durch das BSE-Signal wiedergegeben. Die Messungen mit WDX weisen jedoch auch eine begrenzte laterale Auflösung auf (etwa  $4 \mu\text{m}$ ) und erfordern lange Meßzeiten.

## 4.4 Sekundärionen-Massenspektrometrie

Die Untersuchung beschichteter und umgeformter Oberflächen mit Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) zeigt die ungleichmäßige Verteilung des Beschichtungsmaterials (Bild 4.5). Die Messung wird von geometrischen Effekten der rauhen Probenoberfläche überlagert. Bei der Messung eines Tiefenprofils bis zu einer Probentiefe von ungefähr  $16 \mu\text{m}$  nimmt die Intensität des Zink-Signals über die gesamte Tiefe allmählich ab. Die Dicke des Beschichtungsmaterials ist geringer als die Meßtiefe, aber aufgrund der großen Rauheit und des dadurch nicht gleichmäßigen Abtrags treten auch nach längerer Meßdauer noch Zink-Signale auf.

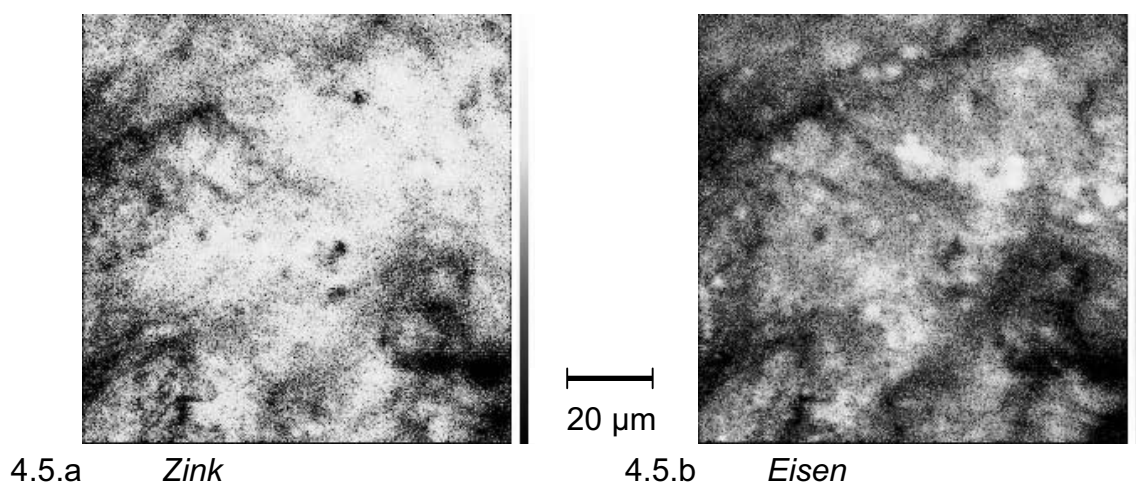


Bild 4.5    *Elementverteilung einer beschichteten Oberfläche (SIMS)*

## 4.5 Bestimmung der Oberflächenrauheit

Zur Messung der Oberflächenrauheit wurde das mechanische Tastschnittverfahren sowie berührungslose optische Rauheitsmessung verwendet. Beim mechanischen Tastschnittverfahren wird durch den Radius der Meßspitze von  $5\text{ }\mu\text{m}$  und den Spitzenwinkel von  $60^\circ$  im Meßsignal ein Hüllprofil der Oberfläche abgebildet, weil die Meßspitze feinen Vertiefungen der Oberfläche mit geringerer Weite nicht folgen kann. Außerdem führt der Anpreßdruck des Meßfühlers dazu, daß das Material der Werkstückoberfläche der harten Diamantspitze des Fühlers ausweicht. Auf der vermessenen Oberfläche ist ein von der Meßspitze hinterlassener Kratzer mit einer Breite von  $5\text{ }\mu\text{m}$  und einer Tiefe von ungefähr  $1\text{ }\mu\text{m}$  sichtbar (Bild 4.6). Die unterschiedliche Härte des Stahls als Werkstück- und des Zinks als Beschichtungswerkstoff führen zu verschiedenen Eindringtiefen. Die Genauigkeit der Werte für die Oberflächenrauheit kann mit ungefähr  $2\text{ }\mu\text{m}$  abgeschätzt werden.

Konfokale Lasermikroskopie und Laser-Profilometrie zeigen, daß die Differenzen der Werte für die Oberflächenrauheit für verschieden beschichtete Oberflächen größer als die Genauigkeit der mechanischen Messung von  $2\text{ }\mu\text{m}$  sind. Die Meßwerte des Tastschnittverfahrens werden daher zum Vergleich der verschiedenen Beschichtungen herangezogen, auch wenn eine Beschädigung der Oberfläche bei der Messung stattfindet.

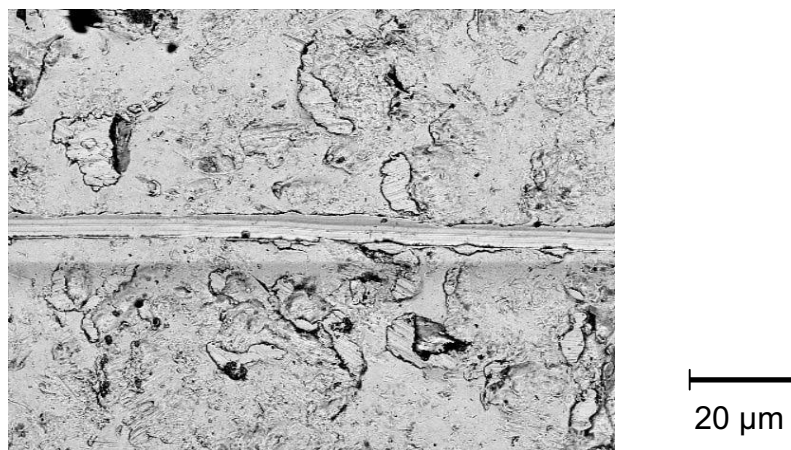


Bild 4.6 *Spur eines Tastschnitts auf der Werkstückoberfläche nach Ablösen der Beschichtung*

## 4.6 Gravimetrie

Bei der gravimetrischen Bestimmung des Schichtgewichts (Kapitel 3.2) sind die Gewichtsunterschiede vor und nach dem Ablösen der Beschichtung sehr klein (0,01 %). Um eine Aussage über den zeitlichen Verlauf des Ablöses treffen zu können, wurde eine beschichtete Oberfläche markiert und die Beschichtung in mehreren Schritten durch Laugen abgelöst. Nach einer Reaktionszeit von insgesamt 15 Minuten sind keine Rückstände des Beschichtungsmaterials mehr vorhanden. Die Oberfläche des Werkstücks wird nicht angegriffen.

Aus dem spezifischen Schichtgewicht der Beschichtung  $m_s$  (Masse / Fläche) läßt sich mit der Dichte des Beschichtungsmaterials  $\rho_s$  eine mittlere Schichtdicke  $\bar{d}_B$  errechnen:

$$\bar{d}_B = \frac{m_s}{\rho_s}$$

Mit der Flächenbedeckung  $f_B$  läßt sich die auf die bedeckte Fläche bezogene mittlere Schichtdicke  $\bar{d}_s$  errechnen:

$$\bar{d}_s = \frac{m_s}{f_B \cdot \rho_s} \qquad f_B = \frac{A_B}{A_{ges}}$$

Es ist offensichtlich, daß das gravimetrische Verfahren keinen Aufschluß über die lokale Verteilung des Beschichtungsmaterials auf der Oberfläche geben kann.

## 4.7 Lokale Schichtdickenmessung

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung des Beschichtungsmaterials ist eine lokale Schichtdickenbestimmung erforderlich. Lokale Messungen an metallographischen Querschliffen sind aufwendig. Die Bestimmung der Schichtdicke aus der Messung der Zusammensetzung mit EDX, die an vielen Stellen der Oberfläche vorgenommenen wurde, ist prinzipiell möglich. Die Eindringtiefe der Elektronen liegt im Beschichtungsmaterial in der Größenordnung von 1,5  $\mu\text{m}$  für Beschleunigungsspannungen von 20 kV. Liegt die Dicke der Beschichtung darunter, kann sie unter



Verwendung der bekannten Zusammensetzung der Beschichtung aus dem Verhältnis der gemessenen Werte für Eisen und Zink errechnet werden. Metallographische Querschliffe zeigen, daß die minimale Schichtdicke auf Rohlingen bei 2  $\mu\text{m}$ , meistens jedoch über 5  $\mu\text{m}$  liegt. In beschichteten Bereichen tritt deshalb kein Signal des Werkstückstahls auf. Die lokale Schichtdickenbestimmung ist auf diese Weise nicht möglich.

Das magnetinduktive Meßverfahren ist prinzipiell zur direkten Bestimmung der lokalen Schichtdicke geeignet. Der Grundwerkstoff des Werkstücks ist ferromagnetisch, der Beschichtungswerkstoff nicht. Die Kalibrierung erfolgt an einer unbeschichteten Probe. Unbeschichtete Bereiche lassen sich erkennen, wenn ihre Ausdehnung den Meßradius der Sonde von 1 mm Durchmesser überschreitet, die unbeschichteten Bereiche liegen aber in einer Größenordnung von maximal 200  $\mu\text{m}$ . Die Rauheit der Werkstückoberfläche führt bei erneuter Messung an dieser Stelle zu Anzeigen von  $\pm 1 \mu\text{m}$  Schichtdicke. In beschichteten Bereichen ist der Einfluß der Rauheit noch größer und überwiegt den der Schichtdicke. Es kommt auch dort zu negativen Anzeigewerten. Um den Einfluß der Rauheit zu verringern, wurden Proben vor der Beschichtung geschliffen. Durch den Beschichtungsvorgang erreicht die Rauheit die gleichen Werte wie die reinigungsgestrahlter Werkstücke und die Beeinträchtigung der Messung bleibt bestehen.

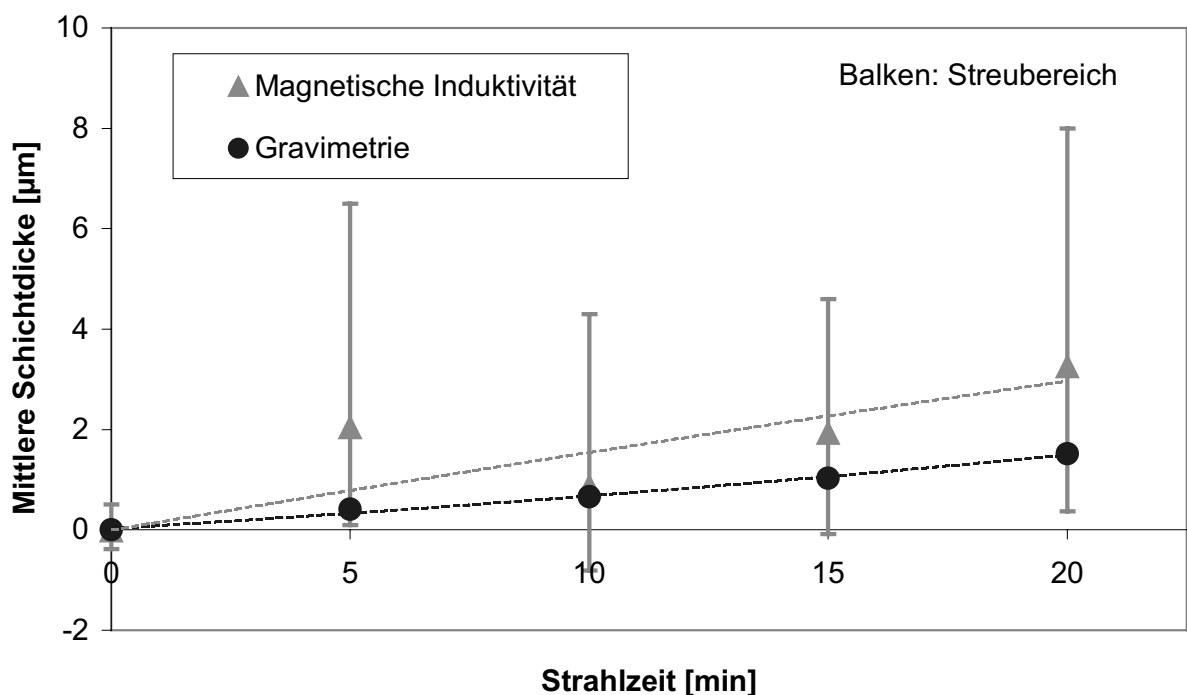


Bild 4.7 Vergleich von Verfahren zur Schichtdickenmessung

In Bild 4.7 sind die Meßergebnisse der gravimetrischen und magnetinduktiven Messung dargestellt. Mit steigender Strahlzeit ergibt sich eine linear steigende mittlere Schichtdicke. Die große Streuung der Mittelwerte von jeweils 20 magnetinduktiven Einzelmessungen ist eine Folge der Variation der Schichtdicken, vor allem aber der großen Rauheit der Oberfläche. Auch mit einer großen Anzahl von Messungen läßt sich deshalb mit der magnetinduktiven Messung keine verlässliche Information über die lokale Schichtdicke gewinnen.

## **4.8 Auswahl der Methoden**

Im Hinblick auf die beabsichtigte Anwendung der Beschichtungen bei der Umformung erscheint sowohl die Menge des Beschichtungsmaterials als auch besonders seine Verteilung auf der Oberfläche relevant. Für die Untersuchungen kamen daher in erster Linie ortsauflösende Verfahren zur Anwendung. Die digitale Auswertung der Aufnahmen des BSE-Signals ist zur Lokalisierung des Beschichtungsmaterials gut geeignet. Die gravimetrische Bestimmung des Schichtgewichts liefert bei meßtechnischer Berücksichtigung der geringen Gewichts differenzen gut reproduzierbare Werte.

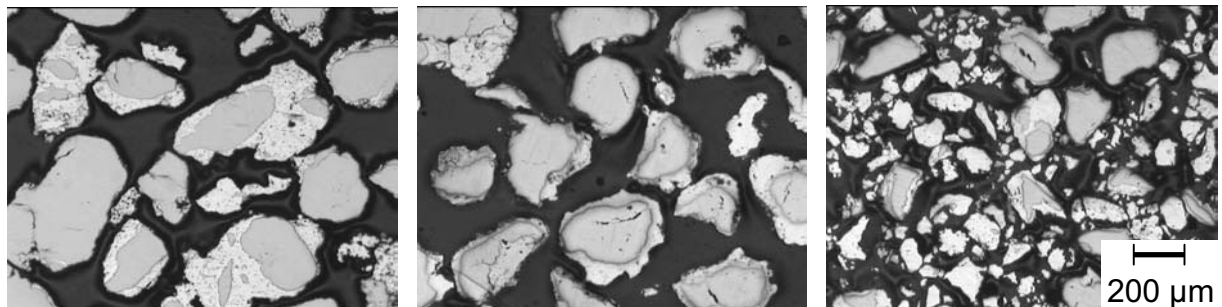
Bei der Untersuchung der beschichteten Oberflächen wurde daher eine gravimetrische Bestimmung der Gesamtmenge und eine Bestimmung der Verteilung des Beschichtungsmaterials anhand der Auswertung des BSE-Signals rasterelektronenmikroskopischer Aufsichten durchgeführt. Die Charakterisierung der Beschichtungen erfolgt durch Angaben zu Schichtgewicht und Flächenbedeckung.

## 5 Aufbau und Verhalten der Strahlmittel

Es wurden zwei Arten von Strahlmittel untersucht und eingesetzt. Eine Strahlmittelart wurde von einem japanischen Lieferanten, die andere vom französischen Projektpartner Acheson bezogen.

### 5.1 Untersuchte Strahlmittel

Die vom japanischen Hersteller gelieferten Strahlmittel bestehen aus ungleichmäßig geformten Stücken mit stark variierender Größe (Bild 5.1). Es standen drei Typen dieser Strahlmittelart zur Verfügung (A, B und C):



5.1.a A

5.1.b B

5.1.c C

Bild 5.1 *Lichtmikroskopische Aufnahmen der Strahlmitteltypen A-C des japanischen Herstellers*

Typ A besteht aus polyedrische Stahlkernen mit einer Größe von 200 µm bis 500 µm und einem Anteil von 20 % kleinerer Partikel. Die Oberfläche der Stahlkerne ist von einer porösen Schale aus intermetallischen Zink-Eisen-Phasen mit einer Dicke zwischen weniger als 10 µm und bis zu 200 µm bedeckt. Kleinere Stahlkerne hängen häufig über eine gemeinsame Schale mit größeren Stahlkernen zusammen. Einige der größeren Stahlkerne sind nur zum Teil oder gar nicht von einer Schale bedeckt.

Die Kerne des Typs B zeigen die gleiche Größe und einen geringeren Anteil kleinerer Partikel. Die Stahlkerne sind voneinander getrennt und besitzen ihre eigene Schale. Die Schalendicke liegt bei etwa 10 µm bis 100 µm. Einige Stahlkerne sind teilweise oder vollständig unbeschichtet.

Typ C besteht aus Bruchstücken mit Größen zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  und unregelmäßig geformten und mit einer Schale umschlossenen Stahlkernen mit einer Größe von 50  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$ . 80 % der Teilchen weisen keinen Stahlkern auf.

In der chemischen Zusammensetzung zeigen die drei Typen keine signifikanten Unterschiede. Neben Eisen und Zink als Hauptbestandteile sind Aluminium und Verunreinigungen durch Natrium, Phosphor und geringe Mengen von Chrom, Kupfer, Magnesium, Mangan, Molybdän, Nickel, Zinn sowie Antimon, Blei und Kalzium enthalten.

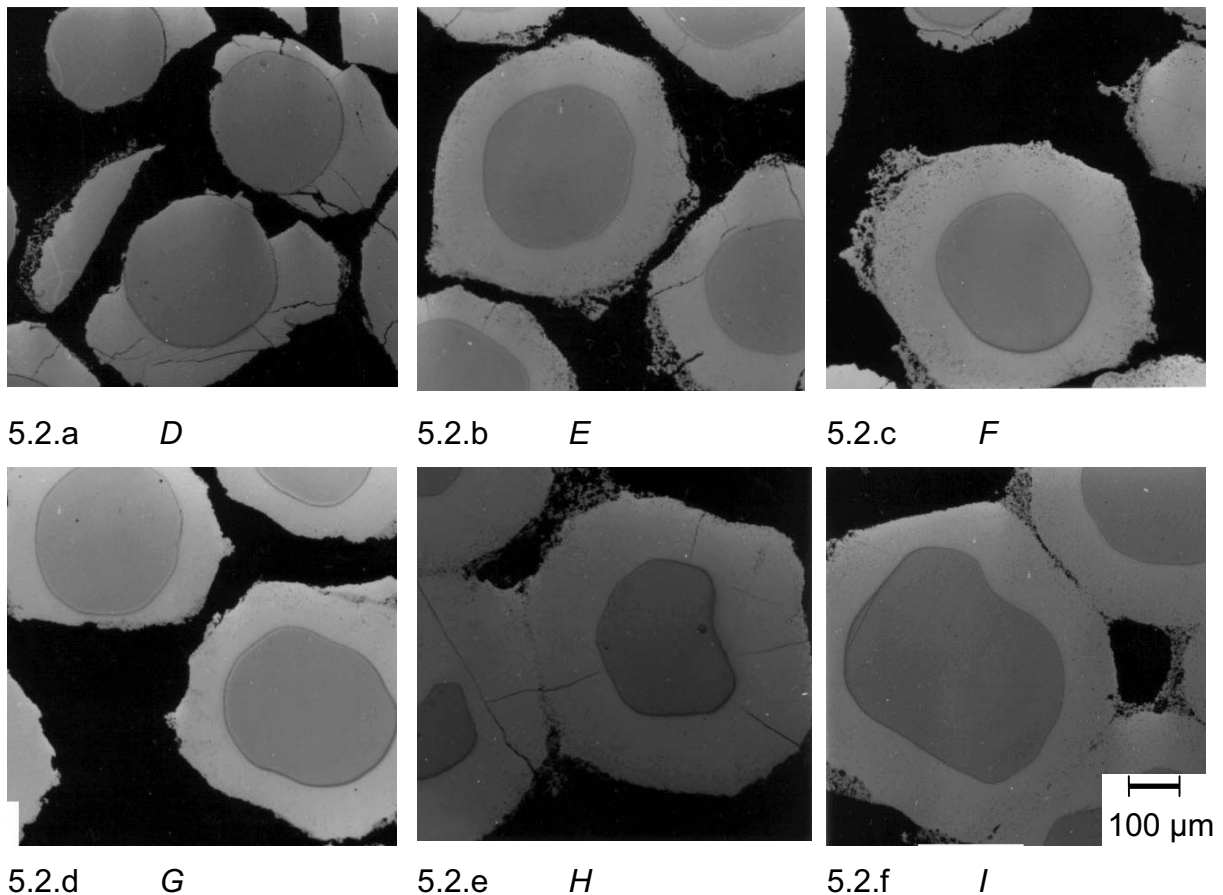


Bild 5.2 *Lichtmikroskopische Aufnahmen der Strahlmitteltypen D-I des Herstellers Acheson*

Die zweite Strahlmittelart des französischen Projektpartners (Acheson) besteht aus runden Stahlkernen, die vollständig und gleichmäßig von einer zinkreichen Schale umgeben sind. Es waren sechs verschiedene Varianten verfügbar (Bild 5.2). Bei den Typen D, E, F und G beträgt der mittlere Durchmesser der kugelförmigen Stahlkerne 300  $\mu\text{m}$ , bei H und I 400  $\mu\text{m}$ . Die verschiedenen Typen unterscheiden sich hauptsächlich in der von D bis I abnehmenden Anzahl von Rissen innerhalb der

zinkreichen Schale. Die Schalen des Typs D beispielsweise zeigen eine große Anzahl Risse. Die Schalen des Typs I weisen keine Risse auf. Tabelle 5.1 enthält die Charakteristika der verschiedenen Strahlmitteltypen.

Die Bestimmung der Zusammensetzung des runden Strahlmittels mit RFA ergibt für alle Typen neben Eisen, Zink und Aluminium Verunreinigungen mit Natrium und Phosphor sowie geringe Mengen von Kalzium, Magnesium und Mangan. Die übrigen im kantigen Strahlmittel enthaltenen Elemente treten nicht auf.

Typ	Durchmesser der Stahlkerne [µm]	Dicke der zinkreichen Schale [µm]	Struktur der zinkreichen Schale	Anteil an Oberfläche mit inhomogener äußerer Schicht [%]	Agglomeration von Teilchen [%]
A-C	~ 200	0 - 100	porös	0	20
D	300	5 - 100	Risse in 100 % der Schalen, Schale teilweise ausgebrochen	5	0
E		20 - 90	Risse in 50 % der Schalen	30	
F		50 - 120	Risse in 30 % der Schalen, teilweise porös	10	
G		80 - 100	keine Risse	20	
H	400	50 - 220	Risse in 90 % der Schalen	60	30
I		100 - 150	keine Risse	80	50

Tabelle 5.1 Charakteristika der untersuchten Strahlmitteltypen

## 5.2 Strahlmittel für Beschichtungsversuche

In industriellen Strahlanlagen und den Druckluft-Strahlversuchen wurde eine Mischung aus 50 % des Typs A und je 25 % der Typen B und C des japanischen Herstellers eingesetzt. Diese Mischung wird entsprechend der äußeren Form im Folgenden als „kantiges Strahlmittel“ bezeichnet.

Vorversuche mit den unterschiedlichen Typen der Strahlmittel der Firma Acheson zeigten, daß die Unterschiede in der Größe und der Beschaffenheit der Schalen der Typen D-I wenig Einfluß haben. In dieser Arbeit wurde deshalb in den Druckluft-Strahlversuchen und den industriellen Strahlanlagen nur das Strahlmittel des Typs I verwendet. Dieses Strahlmittel wird im Folgenden als „rund“ bezeichnet.

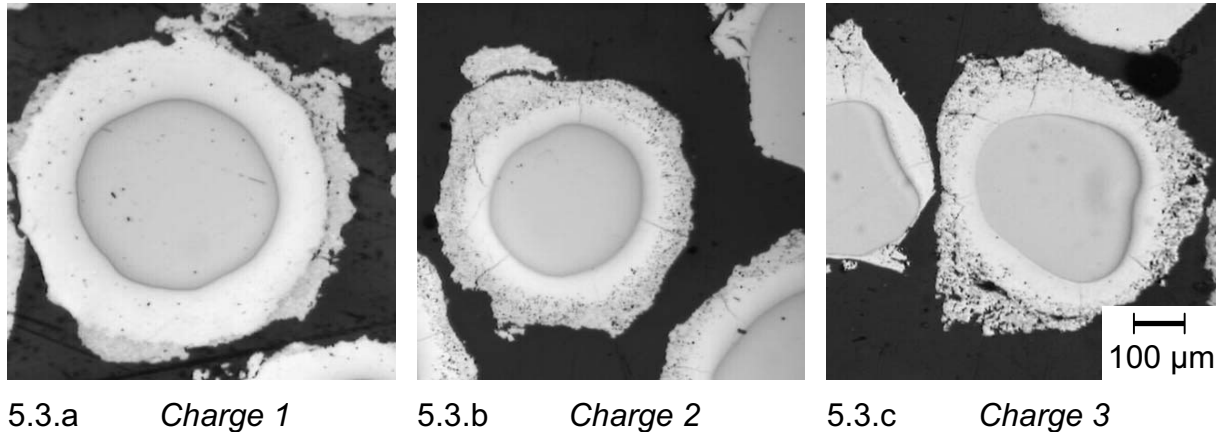


Bild 5.3 *Lichtmikroskopische Aufnahmen des für die Strahlversuche eingesetzten runden Strahlmittels der Firma Acheson (Chargen des Strahlmittels Typ I aus Bild 5.2)*

Die Bilder 5.3.a, 5.3.b und 5.3.c zeigen drei verschiedene Chargen des runden Strahlmittels. Die Stahlkerne mit einem Durchmesser von 400 µm sind fast perfekt kugelförmig und vollständig von einer zinkreichen Schale mit einer Dicke von 100 µm umgeben. Die Oberfläche sämtlicher Teilchen ist zusätzlich von einer porösen, inhomogenen Schicht bedeckt. An manchen Stellen ist diese Schicht sehr dünn, an anderen erreicht sie eine Dicke von 60 µm. Die helleren Bereiche dieser Schicht weisen die gleiche Zusammensetzung wie die eigentliche zinkreiche Schale auf. Dunklere Bereiche bestehen durchschnittlich aus 17 at% Zink, 24 at% Eisen und 59 at% Aluminium.

In Tabelle 5.2 sind einige Charakteristika der Strahlmittelarten zusammengefaßt. Bild 5.4 zeigt die Zusammensetzung des runden Strahlmittels. Die mittlere Zusammensetzung der zinkreichen Schale ist 86 at% Zink, 9 at% Eisen und 5 at% Aluminium. Bei der Herstellung stellt sich ein Gradient des Aluminiumgehalts von 2 at% in der Nähe des Stahlkerns bis auf 8 at% am äußeren Rand der Schale ein.

Art	Gesamtdurchmesser [μm]	Durchmesser des Stahlkerns [μm]	Dicke der zinkreichen Schale [μm]	Struktur
Kantig	10 - 500	100 - 500	0 - 200	Ungleichmäßig beschichtet
Rund (Charge 1)	645	415	115	Poröse äußere Schicht auf 80 % der Schale, deutlich von dieser getrennt
Rund (Charge 2)	620	380	120	Poröse Schicht ist Teil der Schale mit einer Stärke von 50 % der Schalendicke; radiale Risse
Rund (Charge 3)	610	390	110	Poröse Schicht macht 50 % der Schale aus; deutliche radiale Risse

Tabelle 5.2 Charakteristika der verwendeten Strahlmittel

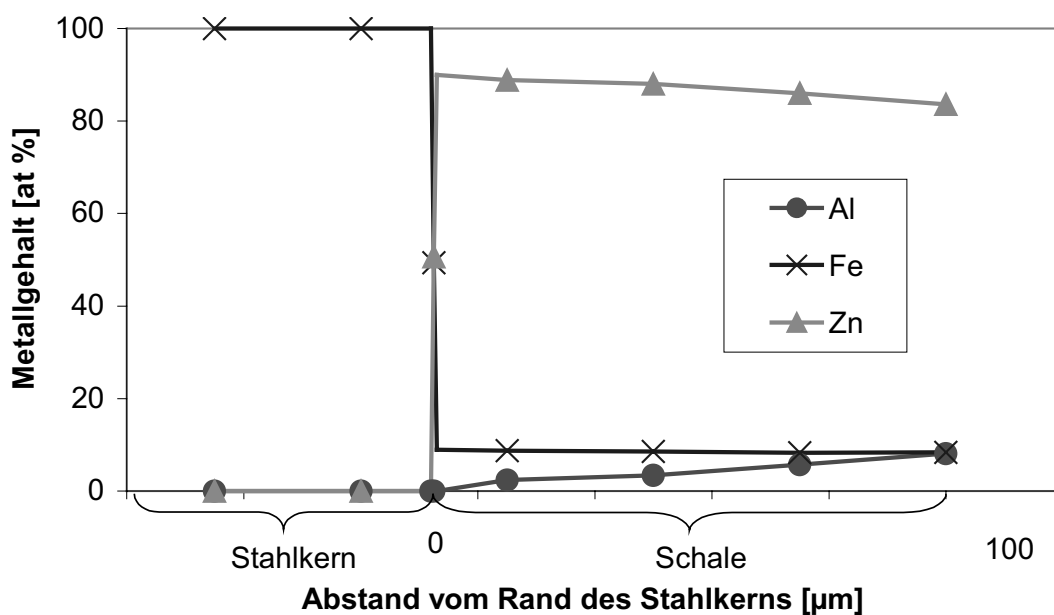
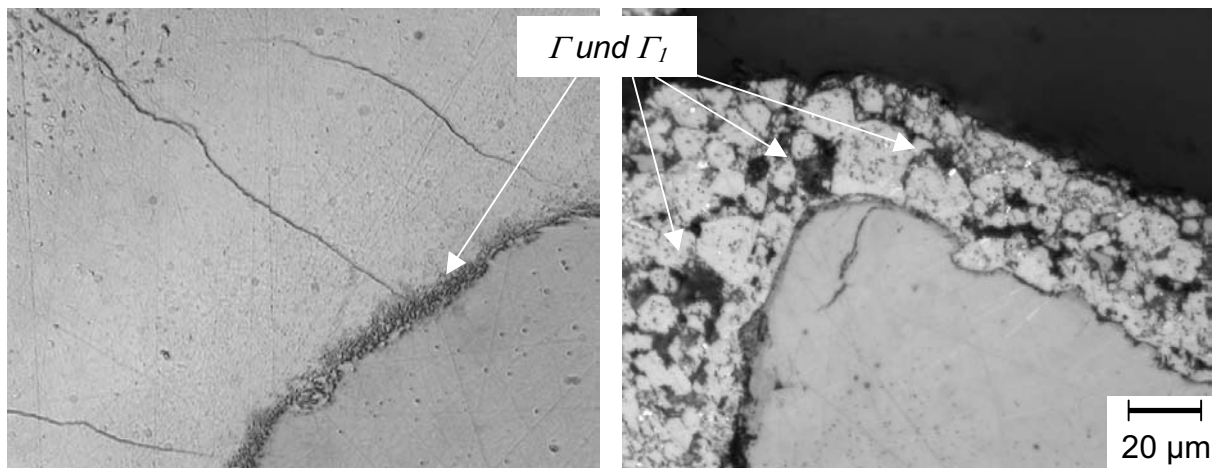


Bild 5.4 Zusammensetzung des runden Strahlmittels

Röntgendiffraktometrie zeigt die Anwesenheit von drei zinkreichen Zink-Eisen-Phasen in der Schale,  $\delta$ ,  $\Gamma$  und  $\Gamma_1$ . Farbätzung zeigt in Bild 5.5 die Position von  $\Gamma$  und  $\Gamma_1$  am Rand des Stahlkerns. Die Löslichkeit von Aluminium in  $\Gamma$  im ternären System Aluminium-Eisen-Zink liegt bei 2 at%, die Löslichkeit in  $\delta$  bei 5 at%. Bei der Herstellung des Strahlmittels bleibt nur ein Gehalt von 2 at% Aluminium bis zur Löslichkeitgrenze in der Schicht aus  $\Gamma$  und  $\Gamma_1$  nahe dem Stahlkern. In der Phase  $\delta$  der Schale bleibt entsprechend mehr Aluminium gelöst. Am äußeren Rand

überschreitet der Aluminiumgehalt die Löslichkeitsgrenze in  $\delta$  und es treten intermetallische Phasen des Systems Aluminium-Eisen auf.

Die Schale des kantigen Strahlmittels weist alle vier im System Eisen-Zink auftretenden intermetallischen Phasen,  $\delta$ ,  $\Gamma$ ,  $\Gamma_1$  und  $\zeta$  auf. Sie besitzt ein heterogenes, poröses Gefüge, in dem die verschiedenen Phasen in Form globularer, voneinander getrennter Partikel auftreten. Die spröden Phasen  $\Gamma$  und  $\Gamma_1$  befinden sich an den Korngrenzen und bewirken ein makroskopisch sprödes Verhalten der Schale.



5.5.a *Rundes Strahlmittel*

5.5.b *Kantiges Strahlmittel*

Bild 5.5 *Verteilung der Phasen  $\Gamma$  und  $\Gamma_1$  in den verwendeten Strahlmitteln*

Der unterschiedliche Aufbau der Strahlmittelarten zeigt sich auch deutlich in der Härte (Bild 5.6). Die Stahlkerne des runden Strahlmittels besitzen eine Härte von 350 HV 0,05. Die Härte der Schale reicht von 300 HV 0,05 am Rand des Stahlkerns bis zu 200 HV 0,05 am äußeren Rand.

Beim kantigen Strahlmittel fällt die Härte dagegen sprunghaft am Übergang vom Stahlkern zur Schale ab. Die Härte der Stahlkerne liegt mit 440 HV 0,05 um etwa 25 % höher als die der Kerne des runden Strahlmittels. Die Schale der Typen A und C ist deutlich weicher als die Schale des runden Strahlmittels. Vom Rand des Stahlkerns nimmt die Härte von 150 HV 0,05 bis auf 100 HV 0,05 am äußeren Rand ab. Die Schale des Typs B ist mit 300 HV 0,05 nahe des Stahlkerns bis 220 HV 0,05 nahe des äußeren Rands deutlich härter als die der Typen A und C.



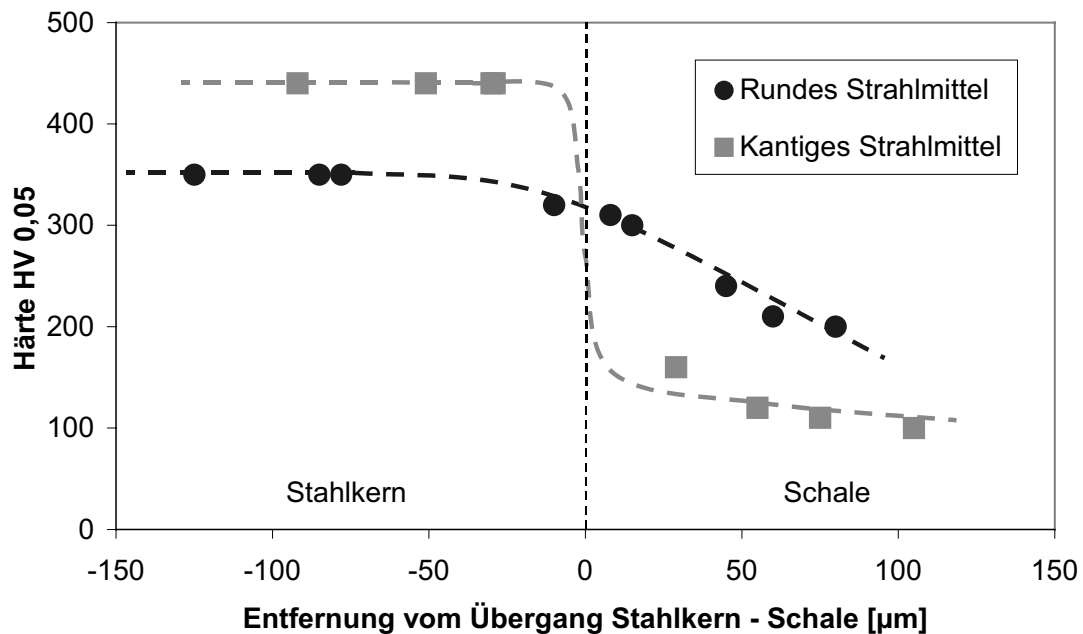
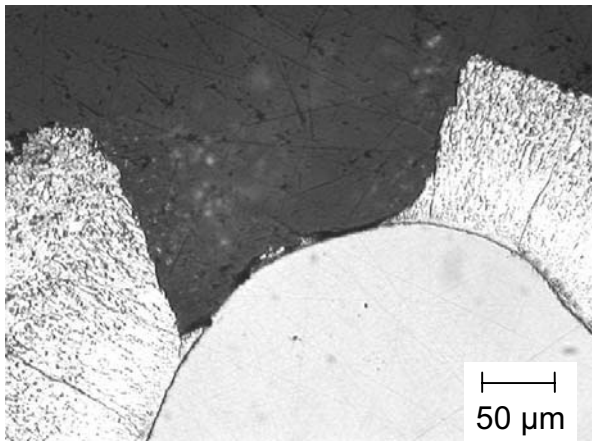


Bild 5.6 Härte der Stahlkerne und der Schalen der verwendeten Strahlmittel

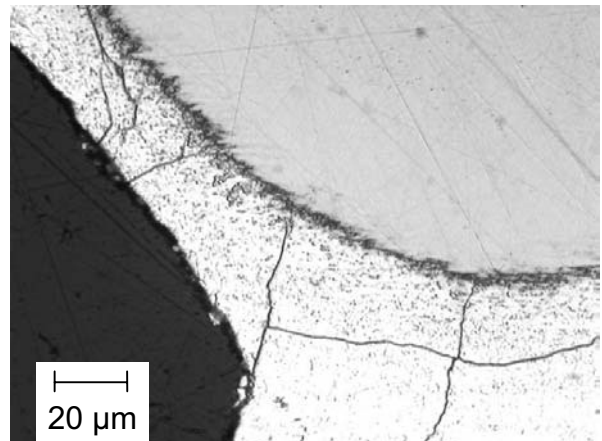
### 5.3 Verhalten der Strahlmittel beim Beschichtungsvorgang

Bild 5.7 zeigt runde Strahlmittelteilchen nach einem Strahlvorgang. Nach einem Aufprall auf die Oberfläche des Werkstücks ist ein Teil der Schale ausgebrochen (Bild 5.7.a). Weist die Schale im Ausgangszustand zusammenhängende Risse auf, wird nur ein Teil davon abgetrennt (Bild 5.7.b). Nach weiteren Umläufen ist die Schale bis zum Stahlkern abgetragen. Außer den Stahlkernen enthält das Strahlmittel nach dem Strahlvorgang Bruchstücke der Schale mit einer Größe von 5 µm bis 200 µm (Bild 5.8). In industriellen Strahlanlagen entfernt ein Magnetabscheider die Stahlkerne ohne zinkreiche Schale aus dem Umlauf.

Das kantige Strahlmittel zerbricht beim Aufprall in Bruchstücke mit einer Größe von 10 µm bis 50 µm, daneben liegen einzelne Partikel mit einer Größe bis zu 200 µm vor (Bild 5.9.a). Nach weiteren Umläufen tragen die Stahlkerne keine zinkreiche Schale mehr (Bild 5.9.b).

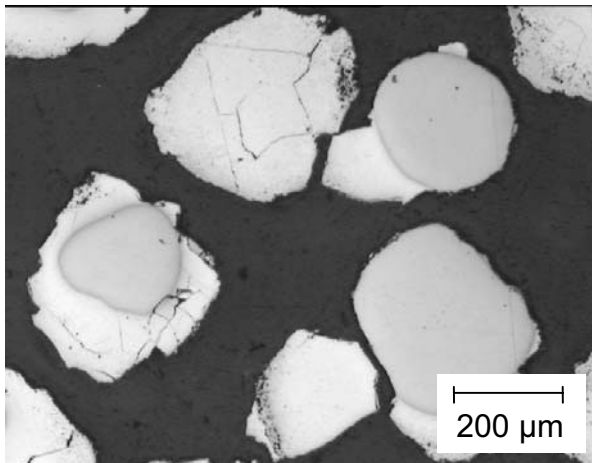


5.7.a Ausgebrochene Schale

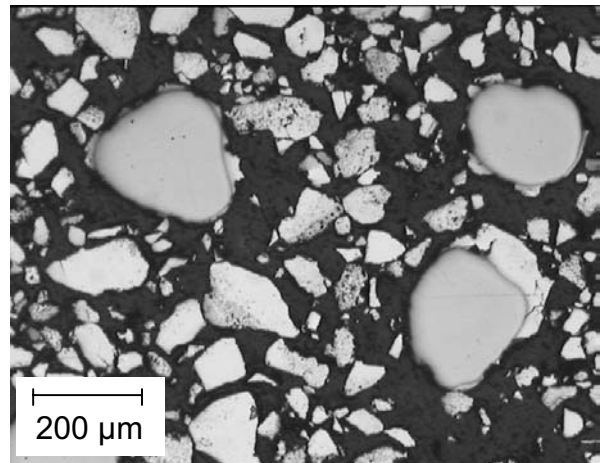


5.7.b Schale mit Rissen

Bild 5.7 Schädigung der Schale des runden Strahlmittels nach einem Umlauf

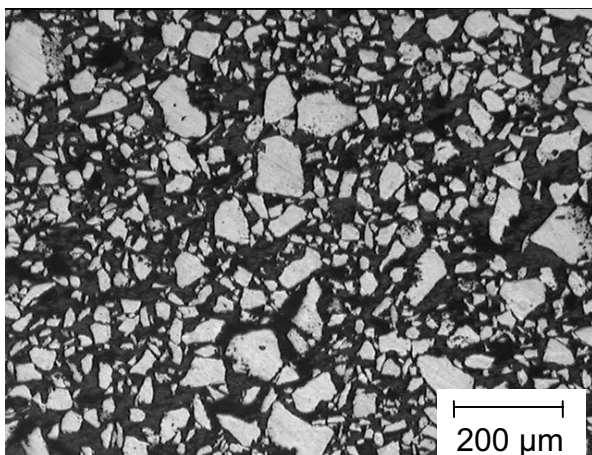


5.8.a Strahldauer 100 s

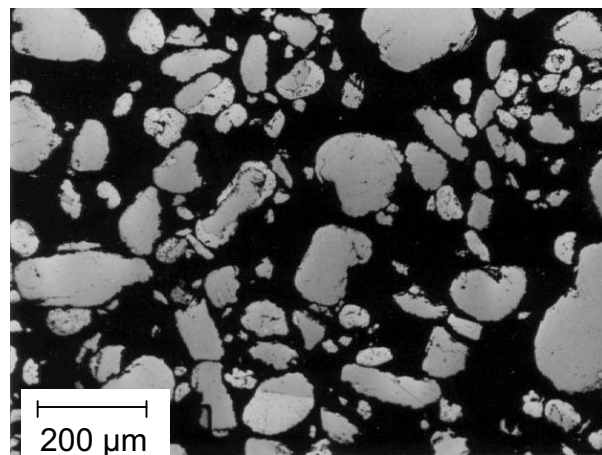


5.8.b Strahldauer 200 s

Bild 5.8 Rundes Strahlmittel nach stetigem Strahlen im Umlauf



5.9.a Strahldauer 100 s



5.9.b Strahldauer 200 s

Bild 5.9 Kantiges Strahlmittel nach stetigem Strahlen im Umlauf